

**MEJORA DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO EN EL PROCESO DE
INYECCIÓN DE POLÍMEROS UTILIZANDO TEORÍA DE LA INFORMACIÓN**

JOSÉ ALEJANDRO BETANCUR MEJÍA

**UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN, COLOMBIA
2015**

**MEJORA DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO EN EL PROCESO DE
INYECCIÓN DE POLÍMEROS UTILIZANDO TEORÍA DE LA INFORMACIÓN**

JOSÉ ALEJANDRO BETANCUR MEJÍA

**Trabajo de grado presentado como
requisito para optar al título de
Magister en Ingeniería**

**ASESOR:
JUAN GUILLERMO LALINDE**

**UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN, COLOMBIA
2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, Junio del 2015

DEDICATORIA

A mi esposa que ha sido el impulso durante todo este periodo académico y el pilar principal para la culminación del mismo, que con su apoyo constante y amor incondicional ha sido fuente de sabiduría, calma y consejo en todo momento.

A mis padres y mi hermano que con su amor y enseñanza sembraron las virtudes que se necesitan para vivir con determinación y felicidad.

José Alejandro Betancur Mejía

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento sincero a mi asesor del trabajo de grado, Juan Guillermo Lalinde Pulido, al Doctor Alberto Naranjo Carvajal y a Juan Camilo Estefan Ángel quienes con su dedicación y asesoría hicieron posible la culminación de este proyecto.

Muchas gracias al Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho, por compartir sus experiencias y recursos para poder realizar el trabajo planteado.

Finalmente muchas gracias a Dios y a todas las personas que de alguna u otra forma estuvieron involucradas en el proyecto y ayudaron a que el mismo se desarrollara de manera satisfactoria.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	10
GLOSARIO.....	11
RESUMEN	12
PALABRAS CLAVES.....	12
1. Introducción	13
2. Problema y justificación	15
3. Objetivos	17
3.1. Objetivo General	17
3.2. Específicos.....	17
4. Estado del arte	18
5. Marco teórico.....	21
5.1. Descripción del proceso de inyección.....	21
5.2. Ecoeficiencia en el uso de energía en la industria de plásticos	23
5.3. Teoría de la información	23
5.3.1. Correlación.....	24
5.3.2. Autocorrelación.....	25
5.3.3. HMM-Modelo oculto de Markov	26
5.4. Ingeniería de Software	27
5.4.1. Metodologías de desarrollo	27
5.4.2. Tecnologías de desarrollo	30
6. Metodología.....	31
6.1. Metodología para la Identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección	31
6.2. Metodología para el desarrollo de software del proyecto	32
7. Desarrollo.....	34
7.1. Identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección	34

7.1.1.	Análisis del proceso de medición	34
7.1.1.1.	Medición de la demanda de energía	34
7.1.1.2.	Duración de las fases del ciclo	37
7.1.1.3.	Características de la pieza inyectada	38
7.1.1.4.	Desfase inicial.....	38
7.2.	Desarrollo del software.....	39
7.2.1.	Visual Story Mapping	39
7.2.2.	Relaese 0	39
7.2.2.1.	Sprint 1	39
7.2.2.2.	Sprint 2	44
7.2.3.	Relaese 1	46
7.2.3.1.	Sprint 1	46
7.2.3.2.	Sprint 2	48
7.2.4.	Release 2	50
7.2.4.1.	Sprint 1	50
7.2.4.2.	Sprint 2	51
8.	Resultados y discusión	52
8.1.	Resultados en la identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección	52
8.1.1.	En la fase de medición	52
8.1.2.	En la fase de análisis.....	52
8.1.3.	Esquema base para el desarrollo	53
8.2.	Resultado del desarrollo de software para el análisis de consumo energético en el proceso de inyección	54
8.3.	Caso real de prueba	54
9.	Conclusiones	57
10.	Trabajo Futuro	57
11.	Referencias.....	58
	Anexo A. Manual de usuario	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases del ciclo de inyección.....	21
Figura 2. Diagrama esquemático de un sistema con corrección	24
Figura 3. Cálculo de una serie de autocorrelación.....	26
Figura 4. Ejemplo de transición de estados en un Modelo Oculto de Markov.....	27
Figura 5. Maquina Inyectora Arburg.....	32
Figura 6. Modelo del proceso SCRUM.	32
Figura 7. Visual Story Mapping del proyecto	33
Figura 8. Pinzas para la medición de la corriente en una inyectora	35
Figura 9. Módulos de adquisicion de datos	36
Figura 10. Software de captura de datos LabView.	36
Figura 11. Serie de tiempo de la demanda de energía	37
Figura 12. Diagrama de tiempos de ciclo.....	37
Figura 13. Desfase inicial establecido por el experto	38
Figura 14. VSM	39
Figura 15. Clases principales	40
Figura 16. Estructura XML de los datos del sistema	41
Figura 17. Gráfica de demanda vs tiempo	42
Figura 18. Comparación de ciclos por sobre-posición	43
Figura 19. Resultados del cálculo de consumo/hora [kWh]	44
Figura 20. Resultados de consumos promedios y por ciclo.....	45
Figura 21. Cálculo del consumo parcial.....	46
Figura 22. Análisis de Autocorrelación 1.....	47
Figura 23. Análisis de Autocorrelación 2.....	47
Figura 24. Análisis de Autocorrelación 3.....	47
Figura 25. Módulo de autocorrelación en el sistema	48
Figura 26. Comportamiento del consumo en máquina: Arburg-100Toneladas, Material: Polipropileno, Peso de la pieza: 22.3 g, Espesor: 3.8mm	49
Figura 27. Comportamiento del consumo en máquina: LienYu-850Toneladas, Material: Poliestireno Cristal, Peso de la pieza: 1405 g, Espesor: 2.5mm	49
Figura 28. Comportamiento del consumo en máquina: KrausMaffei-700Toneladas, Material: Poliestireno Cristal, Peso de la pieza: 732 g (2 cavidades), Espesor: 2.5mm	49
Figura 29. Ineficiencia por correlación.....	50
Figura 30. Curva promedio	51
Figura 31. Esquema del modelo propuesto	53
Figura 32. Pantalla principal del software desarrollado	54
Figura 33. Identificación de anomalías en las mediciones	55
Figura 34. Ejercicio sometido al módulo de "Curva promedio"	55
Figura 35. Ejercicio sometido al módulo de "Autocorrelación".....	56

Figura 36.Ejercicio sometido al módulo de "Diferencias por correlación"	56
Figura 37. Zonas del software	63
Figura 38. Opciones del menú "Archivo"	63
Figura 39. Acerca de.....	64
Figura 40. Mensajes de carga de datos.....	65
Figura 41.Tiempos del ciclo.....	65
Figura 42. Características de la pieza	66
Figura 43. Desfase	66
Figura 44. Cálculo de consumo/hora	67
Figura 45. Gráfico.....	68
Figura 46. Resultados promedios.....	68
Figura 47. Inicio - Comparación ciclos.....	69
Figura 48. Funcionalidad de comparación de ciclos	69
Figura 49. Inicio – Autocorrelación	70
Figura 50. Función de autocorrelación	70
Figura 51. Inicio – Ineficiencia por correlación	71
Figura 52. Diferencias por correlación	71
Figura 53. Inicio - Curva promedio	72
Figura 54. Curva promedio	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales diferencias entre las metodologías tradicionales y las ágiles	28
Tabla 2. Metodologías ágiles	28

GLOSARIO

CEE: Consumo Específico de Energía.

ECOEficiencia: Estrategia para reducir el impacto medioambiental de un producto o servicio aumentando la eficiencia de utilización de los recursos.

INYECCIÓN: Proceso discontinuo de transformación de plásticos que consiste en inyectar un polímero en estado fundido en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado compuerta. En ese molde el material se solidifica. La pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada.

SCRUM: Es un modelo de referencia que define un conjunto de prácticas y roles, y que puede tomarse como punto de partida para definir el proceso de desarrollo que se ejecutará durante un proyecto de software.

SPRINT: Es un periodo de ejecución de una iteración en el modelo SCRUM, el cual tiene que proporcionar un resultado completo.

VSM: En los modelos ágiles, VSM o Visual Story Mapping es una herramienta que permite generar una representación visual del sistema completo. Ofrece una vista general de todas las funcionalidades que lo componen.

RESUMEN

El ahorro de energía se ha convertido en un tema clave para muchos países bajo la presión de la crisis energética y el deterioro ambiental. Monitorear la eficiencia energética y reducir el consumo de energía es hacia donde están enfocados la mayoría de procesos industriales. El moldeo por inyección es uno de los más importantes procesos en la transformación componentes de plásticos y cauchos, que permite la producción de piezas complejas de manera cíclica, pero consume cantidades significativas de energía. La calidad de la información obtenida en el monitoreo del consumo de energía en este proceso es deficiente y obstaculiza su análisis por parte de los expertos, lo que impide tomar decisiones que mejoren el consumo energético en la inyección de polímeros. Debido a lo anterior, el objetivo del presente trabajo es mejorar la calidad de la información de consumo energético en el proceso de inyección de polímeros, utilizando teoría de la información como base para el desarrollo en una herramienta computacional, según los análisis realizados por parte del Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC) ubicado en la ciudad de Medellín, Colombia.

PALABRAS CLAVES

Consumo Específico de Energía, Ciclo de inyección, Herramienta computacional, Análisis de la estabilidad, Teoría de la información.

MEJORA DE LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO EN EL PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS UTILIZANDO TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

1. Introducción

El ahorro de energía se ha convertido en un tema clave para muchos países bajo la presión de la crisis energética y el deterioro ambiental. Monitorear la eficiencia energética y reducir el consumo de energía es hacia donde están enfocados la mayoría de procesos industriales [1]. La inyección de polímeros es uno de los procesos más importantes en la transformación de componentes plásticos y cauchos. En el proceso de inyección se produce una amplia variedad de artículos para el sector de la construcción, doméstico, médico, entre otros. En dicho proceso se generan altas presiones de procesamiento, lo que resulta en un alto consumo de energía eléctrica, el cual se estima puede llegar a ser un 60% del consumo total de la planta [2].

Con el incremento en costos y la escasez de recursos energéticos, hoy en día el control sobre el consumo de energía se hace prioritario. Los sectores en donde más se consume energía son el industrial, transporte, residencial y comercial, todos ellos combinan un consumo total de energía de más de 500 EJ [3] equivalentes a $1,388 \times 10^{14}$ [kWh].

Las compañías de producción necesitan considerar e iniciar la implementación de monitoreos y evaluación de consumo de energía, así mismo como adoptar buenas prácticas que les ayuden a mejorar tanto sus beneficios económicos como su rendimiento ambiental [4]. Desafortunadamente, no hay disponibles muchos métodos y herramientas para soportar la evaluación y mejora del rendimiento energético. En la actualidad la industria emplea herramientas de Evaluaciones de Ciclo de Vida (LCA-Life Cycle Assessment) para evaluar el desempeño de la sostenibilidad (incluyendo el desempeño energético) de los ciclos de vida de los productos. Como el desempeño de sostenibilidad es predominantemente basado en el peso de los productos, ignora factores como las condiciones del proceso y operaciones dependientes de la ejecución de personas [5].

Para aportar a la industria, es pertinente el desarrollo de herramientas que basadas en diversas metodologías puedan contemplar los diferentes factores que afectan las evaluaciones y mejoras en el consumo energético de los procesos de producción. Estas herramientas podrían evaluar las diferentes etapas del desarrollo de productos para apoyar la toma de decisiones, promover el ahorro de energía y sugerir planes de mejora para un mayor rendimiento energético en los procesos industriales [6].

Un proceso particularmente importante y ampliamente utilizado en la industria de plásticos y cauchos es la inyección de polímeros o también llamado moldeo por inyección, para el cual, la calidad de la información obtenida en el monitoreo del consumo de energía es deficiente y

obstaculiza su análisis por parte de los expertos, lo que impide tomar decisiones que mejoren el consumo energético en este proceso. Para esta problemática no se encontró documentación en la revisión analizada hasta este momento.

Dada la deficiente información del consumo energético en el proceso de inyección de polímeros, este trabajo abordará dicha problemática desde la teoría de la información, para demostrar cómo con técnicas basadas en esta teoría se puede mejorar la información del desempeño energético en este proceso, focalizándose a su análisis posterior con el cual se toman decisiones que ayudan a proponer estrategias más precisas para optimizar el rendimiento. Este estudio es la base para el desarrollo de una herramienta computacional que compila los análisis de consumo energético para el proceso de inyección que les será de utilidad a los expertos en esta rama, y que además con pequeñas modificaciones este trabajo puede ser utilizado por otros procesos de fabricación de plásticos como la extrusión.

2. Problema y justificación

El proceso de inyección de polímeros es uno de los más importantes procesos en la transformación componentes de plásticos y cauchos, este permite la producción de piezas complejas de manera cíclica, pero consume cantidades significativas de energía. Lastimosamente la calidad de la información obtenida en el monitoreo del consumo de energía en este proceso es deficiente y obstaculiza su análisis por parte de los expertos, lo que impide tomar decisiones que mejoren el consumo energético en la inyección de polímeros.

La mayor parte de la investigación publicada se centra principalmente en el desarrollo de modelos para la energía y el análisis de la eficiencia en la industria, fábrica, o a nivel de máquina [5]. Algunos otros esfuerzos de investigación intentan abordar la eficiencia energética a nivel de proceso, pero no se encuentra mucho acerca de cómo la calidad de la información obtenida en las mediciones puede afectar el análisis del consumo energético.

Los elementos anteriores indican que es importante someter la información obtenida en una medición de consumo de energía en un proceso de inyección a un análisis de su calidad, para que de esta manera los resultados de consumo que se calculen y las decisiones que se tomen sean más confiables.

Desde hace varios años se vienen realizando diversos estudios acerca del consumo de energía. Por ejemplo: Llu et al. efectuaron un diseño de experimentos con base en el método de Taguchi combinado con un análisis de varianza de proceso (ANOVA) y redes neuronales, con el fin de generar un modelo de optimización de inyección que incluye el consumo de energía en su análisis [7]. En este mismo sentido, Gong et al. trabajaron en un modelo de consumo de energía de transición, con el cual se logra un balance entre bajo consumo de energía y buena calidad de las piezas inyectadas [2]. A nivel local, López et al. han desarrollado trabajos enfocados a cómo seguir e implementar metodologías de optimización energética, en los cuales, en el diseño de experimentos y aplicaciones, logran obtener conjuntos de parámetros óptimos para producir piezas plásticas con el menor consumo energético posible [8, 9].

Partiendo del hecho de que las señales que analizan los expertos en transformación de polímeros transmiten **información** del consumo de los procesos, abordar este problema desde las técnicas de la teoría de la información se vuelve una alternativa factible. La utilización de técnicas basadas en la teoría de la información para consumo de energía ha sido poca, pero ha logrado gran relevancia, ya que la naturaleza de esta teoría posibilita medir el valor informativo de cualquier mensaje desvinculándolo de manera absoluta del sentido que pueda tener el mensaje [10]. Han sido reportados algunos trabajos donde se utiliza la teoría de la información; por ejemplo, Marculescu et al., bajo el punto de vista de esta teoría, asumieron el problema de la estimación del consumo de energía a nivel de transferencia de registros [11]. Así mismo, Filho et al. realizaron un estudio teniendo en cuenta la entropía de cada dispositivo supervisado, que se calculó con base en un modelo de cadena de Markov, el cual identifica novedades a través de un algoritmo de aprendizaje automático [12].

En Colombia hay una creciente preocupación por el uso de la energía en la industria de los plásticos, y se pueden identificar algunas iniciativas de estudios energéticos relacionados con este subsector. La Cámara de Comercio de Bogotá junto al Banco Interamericano de Desarrollo (BID), MIF FOMIN y la Corporación Ambiental Empresarial de Bogotá, desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue realizar una guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector de plásticos [13]. En un primer estudio a nivel regional se realizaron mediciones para diferentes procesos de transformación de plásticos en empresas de la ciudad de Bogotá, con el fin de determinar índices energéticos para la industria del plástico [14]. Villegas y Naranjo realizan un trabajo en el cual presentan una metodología para mejorar la eficiencia energética en el proceso de inyección; para ello utilizaron un sistema de varios componentes que permite obtener los consumos de energía en cada etapa del ciclo de inyección, para de esta forma determinar qué etapa del proceso se puede optimizar [2].

Varios proyectos y estudios se han desarrollado en el Instituto de Capacitación e Investigación del plástico y del Caucho, ICIPC, los cuales le han apuntado a la mejora energética en algunas empresas del sector de plásticos en Colombia, tales como Vinipack, Diax y Prodenvases. Con dichos estudios, estas empresas partiendo de las mediciones energéticas actuales, pudieron establecer un ahorro en energía [2].

Dado lo anterior y entendiendo la problemática actual, en el presente trabajo se propone un marco de herramientas basadas en la teoría de la información para implementar utilidades que mejoren la calidad de la información que se obtiene en las mediciones de consumo energético en el proceso de inyección de polímeros, para facilitar su análisis por parte de los expertos.

La hipótesis del presente trabajo es que la aplicación de la teoría de la información mejora la calidad de la información de consumo energético en el proceso de inyección de polímeros para los análisis realizados en el ICIPC.

En la literatura revisada no se han encontrado herramientas computacionales de este tipo en dicho sector, por lo cual el desarrollo del presente proyecto se convierte en un prototipo que permitirá extender posteriormente más soluciones a un mayor número de problemas relevantes por resolver en el procesamiento de polímeros.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Mejorar la calidad de la información y facilitar el análisis de consumo energético en el proceso de inyección de polímeros utilizando teoría de la información como base para el desarrollo en una herramienta computacional, según los análisis realizados por parte del Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC).

3.2. Específicos

- Identificar los problemas más relevantes en el análisis de los datos de consumo energético en el proceso de inyección de polímeros, según los análisis realizados por parte del ICIPC.
- Desarrollar una herramienta computacional que facilite el procesamiento y análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección de polímeros haciendo uso de las técnicas de la teoría de la información.

4. Estado del arte

Anteriormente, los investigadores se habían concentrado en indagar por la evaluación y mejora del rendimiento del consumo energético en procesos de producción. Estos esfuerzos de investigación pueden ser categorizados en industria, planta, máquinas y procesos. Es importante individualizar los esfuerzos en estos cuatro niveles para entender específicamente la importancia del análisis del consumo de energía en cada nivel del proceso [5].

Se presenta un resumen de la literatura revisada para determinar el consumo de energía para el proceso de inyección alrededor de las cuatro categorías mencionadas. Los artículos revisados que incluyen varias categorías, son discutidos separadamente. Los artículos relacionados con la estimación de energía para otros procesos de producción también son discutidos.

Industria: Los estudios realizados a nivel industrial son hechos con el propósito de encontrar: (i) consumo total de energía, y (ii) consumo promedio de energía por unidad para el sector industrial en una región geográfica particular [5]. Colbert, en el año 2005, menciona que Rapra Technology realizó un estudio para cerca de 165 empresas de Europa, especialmente en Alemania, España y Gran Bretaña. En él se obtuvieron algunos resultados generales de los consumos de energía específicos por países y por tipo de procesos productivos de plástico [15]. Otros autores como Thiriez y Gutowski en el año 2006 realizaron un análisis de consumo de energía en la industria del proceso de inyección [16]. Franklin Associates en el año 2011 cuantificaron el total de energía requerida, fuentes de energía, contaminantes atmosféricos, contaminantes acuáticos, y residuos sólidos para dos procesos de fabricación de plásticos: el proceso de inyección y el termoformado [17]. Mientras, otros autores como Vargas et al. en el año 2014 efectuaron una revisión de estudios realizados de los consumos de energía en la industria del plástico [2].

Planta: El análisis del rendimiento de la energía en producción a nivel de planta se realiza generalmente para mejorar la eficiencia energética de la planta por unidad de rendimiento. Lu et al., en el año 2012, desarrollaron un algoritmo de optimización de parámetros de modelado de procesos usando un algoritmo genético basado en el método lexicográfico. La implementación de su marco redujo el consumo de energía para un ensayo a escala de laboratorio [7]. Pun et al., en el año 2003, identificaron varios indicadores para evaluar el impacto ambiental y establecieron una matriz de medición multi-criterio que toma en cuenta la energía y provee una manera de evaluar el rendimiento ambiental en el proceso de inyección de plástico [18]. Seow y Rahimifard, en el año 2011, desarrollaron un enfoque a un modelo de flujo de energía en un sistema de producción con el objetivo de representar la cantidad de energía atribuida para la fabricación de un producto aplicando el concepto de energía directa, indirecta y auxiliar [19]. Herrmann et al., en el año 2011, presentaron un modelo de simulación orientado a energía para la planeación de sistemas de producción. Su modelo considera situaciones de producción múltiples con todos los flujos de energía pertinentes de los subsistemas de la fábrica y su dinámica [20].

Maquina: Kanungo y Swan, en el año 2008, investigaron el consumo de energía del proceso de inyección de las máquinas totalmente eléctricas e hidráulicas. Compararon varios aspectos como el consumo de energía, el costo, el rendimiento y los parámetros del proceso que afectan el consumo de energía [21]. Li y Kara, en el año 2011, propusieron un modelo empírico para predecir el consumo de energía de los procesos de fabricación [5]. Li et al., en el año 2011, investigaron el consumo de energía fija de la máquina y proponen diferentes formas de mejora de la eficiencia energética; para ello, segmentaron la potencia (o energía) en el consumo específico de energía fija, la energía operativa específica, la energía específica y la energía específica improductiva [22].

Algunos investigadores se refieren a diferentes estados funcionales de una máquina respecto al consumo de energía. Zein et al., en el año 2011, presentaron mediciones de mejora de la eficiencia de energía para el diseño y funcionamiento de máquinas. Utilizaron un diseño axiomático relacionando requisitos funcionales con los parámetros de diseño de la máquina [23]. Schmitt et al., en el 2011, presentaron un enfoque para modelar el consumo de energía de la máquina, que utiliza la relación de demanda de energía y la duración del tiempo con un estado funcional particular de la máquina [24]. Weinert et al., también en el año 2011, propusieron un método que divide las fases operacionales de una máquina en diferentes bloques de energía. Los bloques de energía se utilizan para determinar los requisitos de energía para el producto y la perspectiva del equipo [25]. Avram et al., en el mismo año, presentaron una perspectiva de reducción de consumo de energía, considerando estrategias de mecanizado alternativos y las interacciones de componentes del sistema de flujos traducidos a potencia variable y constante con respecto a diversos regímenes de uso de una fase de máquina [26]. Cannata et al., en el año 2009, estudiaron el análisis de la eficiencia energética y la optimización en la fabricación discreta. Su método representa diferentes estados de una máquina, y su contribución a la producción final [27]. Devoldere et al., en el año 2007, investigaron el potencial de mejora para el consumo de energía de manera discreta en las máquinas de producción. Dividen el uso total de energía en reposo, tiempo de ejecución y los requisitos de energía de proceso [28]. Mouzon et al., en el mismo 2007, desarrollaron métodos operativos para la minimización del consumo de energía de un equipo de fabricación. Se centran en la secuenciación de la producción y la programación para mejorar el rendimiento energético [29].

Proceso: Los investigadores también han estudiado el efecto del proceso para analizar los requerimientos de energía para la fabricación de un producto. Qureshi et al., en el año 2012, presentaron un enfoque empírico para caracterizar la relación entre las variables de consumo de energía y de procesos para el proceso de inyección [30]. Giacone y Manco, en el año 2012, proponen un enfoque para la medición de la eficiencia energética en los procesos industriales. Se discuten tanto la variación en el consumo específico de energía como la tasa de producción en un proceso de la industria [31]. Ribeiro et al., en el mismo año, presentaron un modelo termodinámico que estima el consumo de energía para cualquier parte moldeada por inyección sobre la base de su geometría y el material. Su modelo tiene en cuenta la eficiencia de la máquina para evaluar el consumo de energía [32]. Weissman et al., en el año 2010, desarrollaron una metodología para calcular el consumo de energía para la fabricación de una pieza moldeada por inyección. Se utiliza la información de la pieza para determinar la cantidad

de material y tiempo de ciclo. La energía se calcula sobre la base de la potencia de las unidades de la máquina [33].

Proceso y Planta: Algunos investigadores combinaron la energía necesaria para el proceso y las actividades a nivel de planta para estimar la energía para la fabricación. Rahimifard et al., en el año 2010, presentaron un método para la fabricación de productos con un uso eficiente de la energía a través de modelar la separación detallada de las ineficiencias de energía a lo largo de un sistema de fabricación. Se dividió la energía de fabricación de productos en la de la planta y la del proceso; así mismo, la energía del proceso se dividió en energía teórica y auxiliar [34]. Gotzea et al., en el año 2012, presentaron un enfoque para la evaluación de la energía de la máquina, que consiste en la medición del consumo de energía, la modelación de los flujos de energía, análisis de la simulación de los potenciales de ahorro de energía y conceptos del ciclo de vida orientado a los costos de la energía. Su enfoque de la evaluación se basa en el modelo de entrada-rendimiento-producto con la energía como entrada y las pérdidas de energía del proceso como salida para un caso de estudio del proceso de molienda [35].

5. Marco teórico

5.1. Descripción del proceso de inyección

El proceso de inyección consiste en la fusión de los gránulos de polímero, también conocido como plastificación[36], seguido de la inyección del polímero fundido en un molde. Un molde de inyección típico tiene una o varias cavidades, que son un negativo de la pieza que se está produciendo. Cuando la cavidad se llena con el plástico, se enfría para formar un material sólido resultante en un componente positivo. Después de que se solidifica el polímero fundido e inyectado, el molde, que consiste en dos mitades, se abre, y la parte solidificada se expulsa hacia fuera[37].

El proceso de inyección de plásticos consiste en varios subprocesos o fases, las cuales son (i) cierre de molde, (ii) Movimiento de la unidad de plastificación hacia adelante, (iii) inyección, (iv) pospresión, (v) enfriamiento, (vi) retardo de plastificación, (vii) plastificación, (viii) Movimiento de la unidad de plastificación hacia atrás, (ix) apertura de molde y (x) expulsión. En la Figura 1, se presenta un esquema de las fases de un ciclo de inyección.

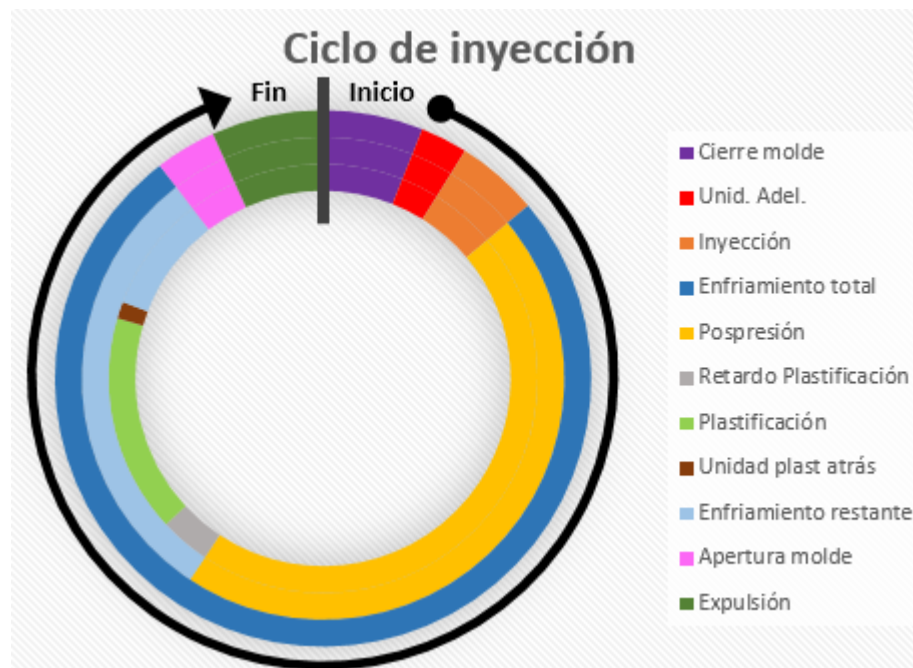


Figura 1. Fases del ciclo de inyección

(i) Cierre de molde: Las mitades de los moldes son cerradas para permitir el llenado de las cavidades.

(ii) Movimiento de la unidad de plastificación hacia adelante: La unidad de inyección se acopla herméticamente con el molde.

(iii) Inyección: El material plástico ya fundido es inyectado a alta presión dentro de la cavidad. Se le conoce como llenado volumétrico, porque durante esta fase se llena completamente el volumen de la cavidad.

(iv) Pospresión: El material inyectado se mantiene a alta presión durante algún tiempo, hasta que empiece a solidificar y pierde presión. Durante este tiempo, se requiere una fuerza externa para oponerse a la presión interna del material y mantener las dos mitades del molde juntos. Tiene por objeto compensar la contracción que necesariamente sufre el material al enfriarse. Durante esta fase se introduce más material a la cavidad y se le conoce con el nombre de llenado gravimétrico, pues durante el mismo la pieza alcanza su peso final.

(v) Enfriamiento restante: El plástico dentro del molde es enfriado por un refrigerante que circula a través de canales de refrigeración en el molde. Este ciclo se completa cuando el material en el molde alcanza una resistencia suficiente para soportar los esfuerzos propios del desmoldeo o expulsión.

(vi) Retardo de plastificación: Retardo opcional con el que se busca que el proceso de plastificación termine cuando el molde se debe abrir. Así se disminuye el tiempo de permanencia del material a la temperatura de fundido.

(vii) Plastificación: Los gránulos de plástico, que se mezclan con desperdicios reutilizables y otros aditivos, se calientan y se funden debido a la fricción generada por la rotación del husillo y por la conducción de calor desde el cilindro.

(viii) Movimiento de la unidad de plastificación hacia atrás: La unidad se retira del molde para evitar conducciones de calor indeseables entre la boquilla y el molde. El husillo que transporta el material, retrocede recargándose nuevamente de material para fundir.

(ix) Apertura de molde: Las mitades del molde se abren para expulsar la parte sólida.

(x) Expulsión: La pieza terminada finalmente se extrae del molde.

El promedio de uso de energía para el proceso de inyección de plástico en los Estados Unidos es de 20 MJ/kg, que incluye otros procesos auxiliares y todo tipo de máquinas de inyección, tales como hidráulica, híbridos y eléctricos [5]. Tal uso de alta energía en el proceso de inyección es comparable a otros procesos como el mecanizado. Sin embargo, el Consumo medio de Energía Específica (CEE) de máquinas de inyección eléctrica sólo es de unos 1,47 MJ / kg [21], que no tienen en cuenta los procesos auxiliares.

5.2. Ecoeficiencia en el uso de energía en la industria de plásticos

En la industria de los plásticos una de las estrategias utilizadas para lograr mayor eficiencia energética son las que buscan incrementar la eficiencia de la transformación de la energía en producto. Estas apuntan a una mejora en la eficiencia en el consumo energético, expresado como un **consumo específico por unidad de material procesado (CEE)**, e impactan principalmente los consumos variables, o sea aquellos atribuibles directamente a los equipos de producción. Estas se logran por lo general mediante un juicioso análisis y modelamiento de los procesos para encontrar puntos óptimos de operación. Estos óptimos se entienden como un balance entre calidad y consumo energético. También por la migración a tecnologías más eficientes en sistemas de transformación de energía, por ejemplo motores y sistemas de calefacción y enfriamiento más eficientes, mejora en diseños de productos, cambio en materias primas, entre otros [1].

El consumo específico de energía (CEE ó SEC del inglés) se calcula a partir de su definición, como se muestra en la Ecuación 1:

$$CEE = \frac{\text{Consumo de energía [kWh]}}{\text{Producción obtenida [Kg]}} \quad (1)$$

El CEE es un indicador que depende de muchas variables, no todas ellas controlables directa e inmediatamente por el usuario. El tipo de tecnología, de producto y de material son algunas de ellas. Otras, como el volumen de producción y los consumos fijos tienen una alta incidencia en este indicador, y son influenciados de una u otra forma por acciones en la compañía, de acuerdo con un plan de gestión energética [1].

5.3. Teoría de la información

La teoría de la información o teoría matemática de la comunicación fue propuesta por Shannon en 1948. Dicha teoría posibilita medir el valor informativo de cualquier señal o mensaje en relación con el esfuerzo requerido para su transmisión, desvinculándolo de manera absoluta del sentido que pueda tener el mensaje [10].

El cómo mejorar la información de consumo de energía en el proceso de inyección puede ser abordado desde la posición del experto u **Observador**, propuesta por Shannon en su teoría matemática de la comunicación (Figura 2 - tomado de Shannon[10]), en la cual

plantea que dicho **Observador** va a tener las herramientas para realizar las correcciones pertinentes para ofrecer una mejor interpretación del mensaje originalmente producido.

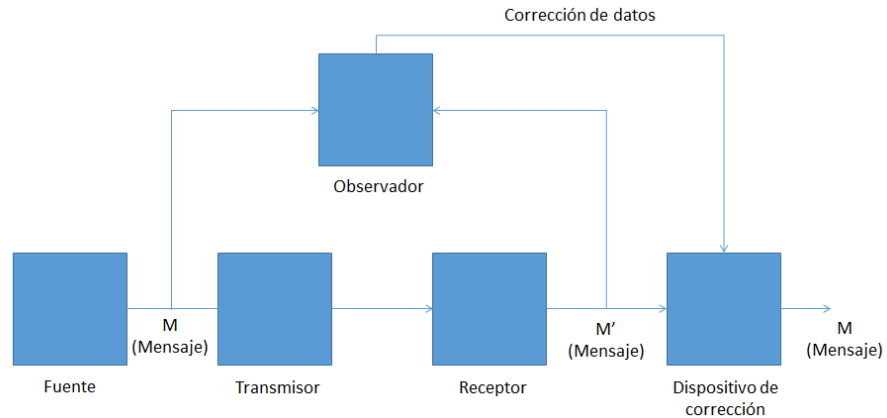


Figura 2. Diagrama esquemático de un sistema con corrección

En la literatura analizada se pudieron encontrar varias aproximaciones en las cuales mediante desarrollos de software se ha realizado el monitoreo del consumo de energía en sectores productivos, utilizando diferentes técnicas de la teoría de la información. Peng y Xu, en el año 2014, realizaron una revisión crítica de la eficiencia energética en los sistemas de maquinados, en el cual evidenciaron el uso de modelos estadísticos y redes neuronales para medir consumos de energía [38]. Filho et al., también en el año 2014, trabajaron en un sistema de alertas de monitoreo remoto del consumo de energía usando técnicas probabilísticas [12].

Dentro de la teoría de la información existen técnicas que se reinterpretan en términos de información, como la correlación, la autocorrelación o modelos ocultos de correlación, que ayudan a realizar análisis importantes, como las mediciones de cantidades de información, la medición de similitudes o medir los cambios en su comportamiento.

5.3.1. Correlación

La correlación es la medida del grado en el cual dos variables, señales o series de tiempo son similares [39]. Esta es una herramienta importante para medir información, tal como es el caso del análisis de la correlación canónica[40]. También se ha podido concluir que las consideraciones informacionales permiten una generalización natural del coeficiente clásico de correlación de una distribución normal [41].

Los métodos disponibles para el análisis de correlación pueden ser divididos en tres grupos mayores basados en sus variables objetivo: (i) métodos aplicables únicamente a variables numéricas, como el coeficiente de correlación de Pearson; (ii) métodos aplicables solamente a variables categóricas, como el Cramér's V; y (iii) métodos aplicables para computar correlaciones entre variables numéricas y categóricas, como el t-test, ANOVA y MANOVA [42].

Partiendo del principio de la eficiencia en el software, el método utilizado en este trabajo es el del coeficiente de correlación de Pearson, debido a que este ofrece resultados válidos en periodos de tiempos cortos. Entre dos series de tiempo $X = (x_i)$ y $Y = (y_i)$, donde $i=1, \dots, N$, el coeficiente de correlación de Pearson, r , puede ser obtenido como se muestra en la Ecuación 2:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2]^{1/2}} \quad (2)$$

Donde \bar{x} denota el promedio de (x_i) y \bar{y} el promedio de (y_i) . El valor de r varía en un rango entre -1 y 1, indicando una correlación lineal perfectamente negativa o positiva, respectivamente. $r = 0$ significa que (x_i) y (y_i) no tienen correlación [43].

5.3.2. Autocorrelación

Cuando la correlación se calcula entre una serie y una versión retardada de sí misma se llama autocorrelación. Una alta correlación es probable que indique una periodicidad o patrón repetitivo en la señal, de la duración de tiempo correspondiente [44].

El coeficiente de correlación con un retardo k de una serie $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$ se da normalmente como se muestra en la Ecuación 3:

$$autocorrelation(k) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=0}^{N-1-k} (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Siendo \bar{x} la media de la serie. Si el coeficiente de correlación se calcula para todos los lags o retardos $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, la serie resultante se llama la serie de autocorrelación o correlograma. La serie de autocorrelación se puede calcular directamente como se muestra en la Ecuación 3 [44].

La Figura 3 muestra cómo se va construyendo una serie de autocorrelación a medida que se va desplazando una serie de datos sobre ella misma durante unos retardos o lags. Se puede evidenciar que cuando inicia este análisis se tiene una máxima autocorrelación (1) y mientras se desplaza va disminuyendo, si es un comportamiento diferente, o aumentando cuando encuentra comportamientos similares.

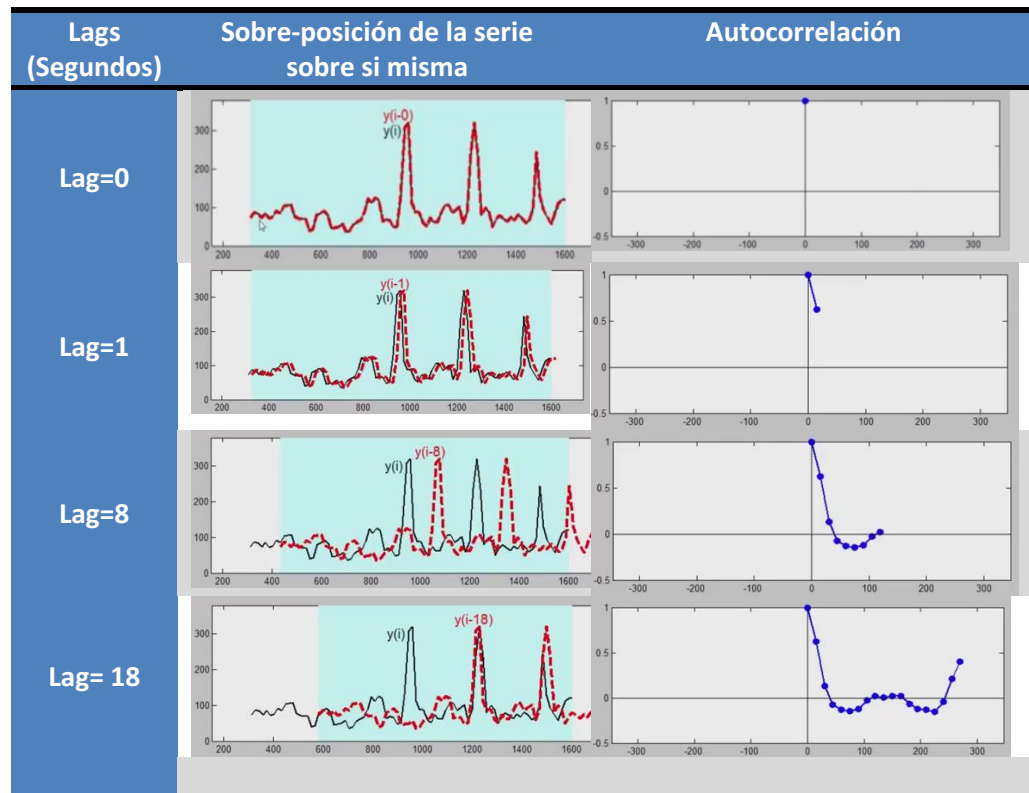


Figura 3. Cálculo de una serie de autocorrelación

5.3.3. HMM-Modelo oculto de Markov

Es un modelo estadístico en el que se asume que el sistema a modelar es un proceso de Markov de parámetros desconocidos. El objetivo es determinar los parámetros desconocidos de dicha cadena a partir de los parámetros observables. Los parámetros extraídos se pueden emplear para llevar a cabo sucesivos análisis, por ejemplo, en aplicaciones de reconocimiento de patrones, como los sistemas de reconocimiento del habla [45].

En un modelo de Markov normal, el estado es visible directamente para el observador, por lo que las probabilidades de transición entre estados son los únicos parámetros. En un modelo oculto de Markov, el estado no es visible directamente, sino que sólo lo son las variables influidas por el estado. Cada estado tiene una distribución de probabilidad sobre los posibles símbolos de salida. Consecuentemente, la secuencia de símbolos generada por un HMM proporciona cierta información acerca de la secuencia de estados [45].

El diagrama que se observa en la Figura 4 (Tomada de [45]) muestra la arquitectura general de un HMM. Cada óvalo representa una variable aleatoria que puede tomar determinados valores. La variable aleatoria $x(t)$ es el valor de la variable oculta en el instante de tiempo t . La variable aleatoria $y(t)$ es el valor de la variable observada en el mismo instante de tiempo t . Las flechas indican dependencias condicionales [45].

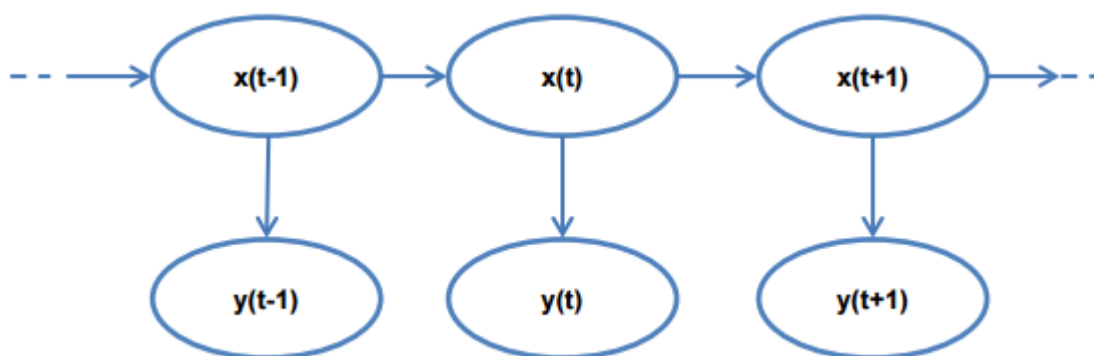


Figura 4. Ejemplo de transición de estados en un Modelo Oculto de Markov

En la Figura 4 adicionalmente se establece que el valor de la variable oculta $x(t)$ sólo depende del valor de la variable oculta $x(t-1)$. A esto se le llama propiedad de Markov. De forma similar, el valor de la variable observada $y(t)$ sólo depende del valor de la variable oculta $x(t)$ [45].

5.4. Ingeniería de Software

5.4.1. Metodologías de desarrollo

Se ha discutido en los círculos de ingeniería de software durante décadas cómo el desarrollo de software se debe organizar con el fin de entregar productos más rápido, con mejor calidad, y más baratos. Muchas propuestas de mejora se han sugerido; la normalización, la medición del proceso software y una multitud de herramientas, técnicas y prácticas [46].

Existen 2 tipos de metodologías para el desarrollo de software que son las tradicionales y las ágiles. Las metodologías ágiles son definidas como las metodologías que permiten despojarse de la mayor cantidad de pesadez como sea posible, comúnmente asociado con las metodologías de desarrollo de software tradicionales, para promover la rápida respuesta a los cambios del entorno, los cambios en los requisitos del usuario, los plazos del proyecto y similares [46]. En la Tabla 1 (tomada de Nerur et al. [47]) podemos encontrar la comparación entre las metodologías tradicionales y las ágiles.

Tabla 1. Principales diferencias entre las metodologías tradicionales y las ágiles

	Metodologías tradicionales	Metodologías ágiles
Supuesto fundamental	Los sistemas son totalmente determinables, predecibles, y se construyen a través de una planificación meticulosa y extensa	Software adaptativo de alta calidad que es desarrollado por pequeños equipos que utilizan los principios de la mejora continua del diseño y las pruebas, basadas en la retroalimentación rápida y el cambio
Estilo de administración	Comando y control	Liderazgo y colaboración
Gestión del conocimiento	Explícito	Tácito
Comunicación	Formal	Informal
Modelo de desarrollo	Modelos de ciclo de vida (Cascada, espiral o alguna variación)	El modelos de entregas evolutivas
Estructura organizativa	Mecanicista (Burocrático con alta formalización), dirigido a grandes organizaciones	Orgánica (flexible y participativa, fomentando la acción social cooperativa), dirigido a organizaciones pequeñas y medianas
Control de Calidad	Planificación pesada y un estricto control. Tardíamente, se ejecutan pruebas pesadas.	Control continuo de requisitos, diseño y soluciones. Pruebas continuas.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de las metodologías de desarrollo ágiles más referenciadas.

Tabla 2. Metodologías ágiles

Metodología ágil	Descripción	Referencia
Metodologías Crystal	Una familia de métodos para los equipos co-localizados de diferentes tamaños y criticidad: Claro, Amarillo,	[48]

		Naranja, Rojo, Azul. El método más ágil, Crystal Clear, se centra en la comunicación en pequeños equipos de desarrollo de software que no son críticos. Desarrollo Claro tiene siete características: entrega frecuente, de mejora reflectiva, comunicación osmótica, seguridad personal, enfoque, fácil acceso a usuarios expertos, y los requisitos para el entorno técnico	
Método de desarrollo software Dinámico (DSDM)	de de	Divide los proyectos en tres fases: pre-proyecto, ciclo de vida del proyecto, y pos-proyecto. Nueve principios subyacen DSDM: participación de los usuarios, potenciando el equipo del proyecto, la entrega frecuente, frente a las necesidades de negocio actuales, el desarrollo iterativo e incremental, permitir revertir los cambios, el alcance de alto nivel se fija antes del comienzo del proyecto, las pruebas a lo largo del ciclo de vida, y comunicación eficiente y eficaz.	[46]
Desarrollo Orientado Características	a	Combina el desarrollo orientado al modelo y ágil con énfasis en el objeto de modelo inicial, la división del trabajo en funciones y el diseño iterativo para cada función. Se declara que es adecuado para el desarrollo de modelos críticos. Una iteración de una función consta de dos fases: diseño y desarrollo.	[46]
Desarrollo software Lean	de	Una adaptación de los principios de la producción LEAN y, en particular, el sistema de producción de Toyota al desarrollo de software. Consta de siete principios: eliminar los residuos, ampliar el aprendizaje, decidir lo más tarde posible, entregar lo más rápido posible, potenciar el equipo, fomentar la integridad, y ver la totalidad	[49]
Scrum		Se centra en la gestión de proyectos en situaciones en las que es difícil planificar el futuro, con mecanismos para " control de proceso empírico "; donde los bucles de retroalimentación constituyen el elemento central. El software es desarrollado por un equipo auto-gestionado, de manera incremental llamando cada incremento "sprints". Este parte de la planificación y termina con una revisión. Las características que se ejecutarán en el sistema se registran en una cartera de pedidos o Product Backlog. Entonces, el dueño del producto o Product Owner decide qué elementos del Backlog se deben desarrollar en el siguiente sprint. Los miembros del equipo coordinan su trabajo en una reunión de pie diaria, para que sea más efectiva, o también conocida como daily meeting. Un miembro del equipo, el Scrum master, es el encargado de resolver los	[46]

	problemas que impiden que el equipo de trabajo sea eficaz.	
Programación Extrema (XP; XP2)	Se centra en las mejores prácticas para el desarrollo. Consta de doce prácticas: el juego de planificación, comunicados pequeños, metáforas, diseño simple, pruebas, refactorización, la programación en parejas, propiedad colectiva, integración continua, 40 horas por semana, los clientes en el lugar, y los estándares de codificación. XP2 se compone de las siguientes "prácticas primarias": sentarse juntos, todo el equipo, espacio de trabajo informativo, trabajo con energía, programación por pares, historias, ciclo semanal, ciclo trimestral, holgura, la construcción de 10 minutos, integración continua, primera prueba de programación, y el diseño progresivo.	[50]

5.4.2. Tecnologías de desarrollo

El instituto del plástico -ICIPC- en sus últimos años ha venido desarrollando su software bajo el entorno de desarrollo de Visual Studio .NET [51-55], un entorno de desarrollo producido por Microsoft Corporation y que trabaja generalmente bajo sistemas operativos Windows. Permite la creación de aplicaciones de escritorio, móviles y también web. Soporta diferentes lenguajes de programación, entre los que se incluye: C++, C#, Visual Basic y J#[56].

Para llevar a cabo este proyecto se usó el entorno de desarrollo Visual Studio 2012 Express Edition, con el lenguaje de programación C#, realizando una aplicación de escritorio del tipo Windows Presentation Foundation (WPF) en su parte gráfica y con un manejo de datos en XML.

6. Metodología

6.1. Metodología para la Identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección

El método utilizado para lograr la identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección fue el empírico-analítico en su rama experimental, que ha sido uno de los que más resultados satisfactorios han generado. Aplica la observación de fenómenos, que en un primer momento es sensorial. Con el pensamiento abstracto se elaboran las hipótesis y se diseña el experimento para poder reproducir el objeto de estudio, controlando así el fenómeno y llegar a una posible hipótesis válida. En el método empírico experimental [57], el investigador interviene sobre el objeto de estudio modificando a éste directa o indirectamente, para crear las condiciones necesarias que permitan revelar sus características fundamentales y sus relaciones esenciales, bien sea:

- Aislando al objeto y las propiedades que estudia de la influencia de otros factores.
- Reproduciendo el objeto de estudio en condiciones controladas.

Así, los datos son sacados de la manipulación sistemática de variables en un experimento. Una diferencia clara con el método empírico en general es que éste además trata de considerar los errores de modo que una inferencia pueda ser hecha en cuanto a la causalidad del cambio observado.

En este caso en concreto, al análisis se realizó de dos maneras, la primera fue realizando el análisis de los datos obtenidos durante varios años de cálculos de consumos energéticos en diferentes empresas del sector por el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC). Y la segunda, fue desarrollando sesiones de procesamiento de polímeros en los laboratorios del ICIPC, con la intención de reproducir una sesión de medición de consumo energético y de esta manera identificar los principales problemas.

Se controlaron variables para un proceso de producción estable, como la máquina inyectora, para lo cual se utilizó una máquina Arburg – Allrounder 420C (Figura 5 – Tomada de Arburg [58]), el material, los moldes y los parámetros del ciclo.



Figura 5. Máquina Inyectora Arburg

6.2. Metodología para el desarrollo de software del proyecto

La metodología o marco de trabajo usado para estructurar, planificar y controlar el proceso de desarrollo del software para el análisis de consumo energético en el proceso de inyección fue SCRUM. Este es uno de los métodos ágiles de desarrollo de software, el cual es iterativo-incremental y está enfocado en trabajos que requieran de un despliegue rápido y de necesidades cambiantes [59].

El proceso de esta metodología se describe en la Figura 6 (Tomado de Moran [60]):

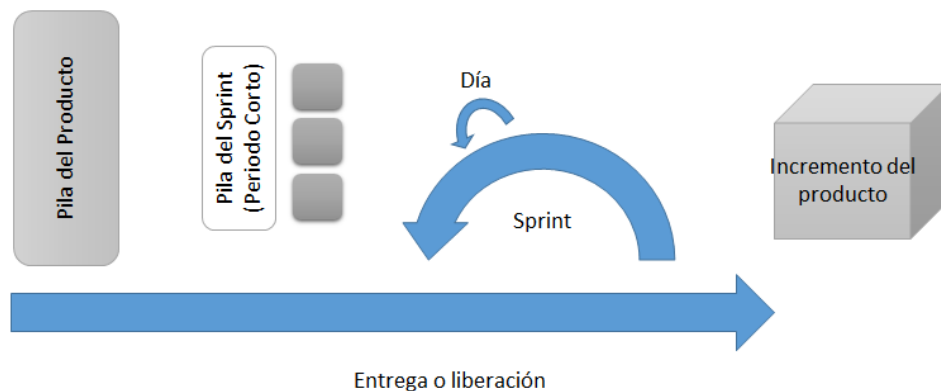


Figura 6. Modelo del proceso SCRUM.

Para este caso en particular, después de identificar los principales problemas del análisis de datos del consumo energético en la inyección de polímeros, se generó un esquema

base para el desarrollo, el cual contiene los elementos o parámetros de entrada, el procesamiento que se debe hacer y finalmente los resultados que el experto necesita. Este esquema se traduce a un Visual Story Mapping, con 3 Releases y finalmente cada Release se lleva a cabo en 2 Sprints de 2 semanas cada uno, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Visual Story Mapping del proyecto

7. Desarrollo

7.1. Identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección

7.1.1. Análisis del proceso de medición

Para realizar las mediciones de consumo de energía en el proceso de inyección de polímeros existen factores de alta relevancia en la medición con los cuales se obtienen los datos que luego serán analizados por los expertos, para después tomar decisiones en pro de su mejora. Estos factores o elementos se detallan a continuación.

7.1.1.1. Medición de la demanda de energía

Para realizar las mediciones se hacen necesarios varios componentes:

- Pinzas de medición de corriente: Estas van alrededor de un cable que genera un campo magnético y es transformado proporcionalmente a la intensidad percibida que luego será leído por los módulos como una señal análoga proporcional a la corriente.

Cada pinza está marcada y pertenece estrictamente a una línea de corriente, además se debe ubicar con la dirección correcta, ya que esto puede incidir en la lectura de los datos, como se muestra en la Figura 8.

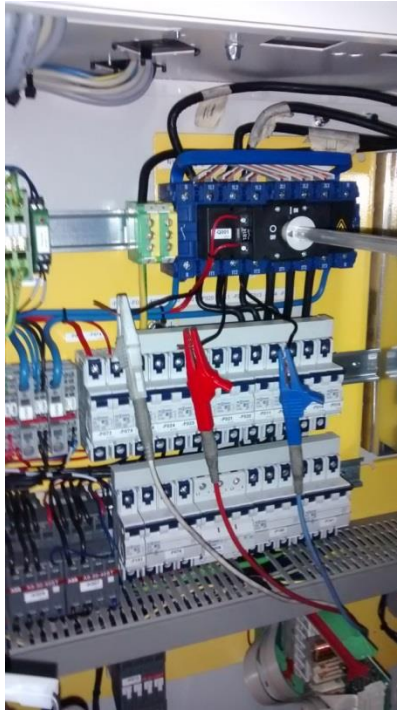


Figura 8. Pinzas para la medición de la corriente en una inyectora

- Módulos (Tarjetas de acople de voltaje - ICIPC): Son los que se encargan de medir tanto la corriente como el voltaje de la inyectora, que a través de unas correas de datos los transportan hasta los módulos de adquisición de datos.
- Módulos de adquisición de datos: transforman la información medida de analógica a digital y se puede adquirir su información a través de USB, como se muestra en la Figura 9:

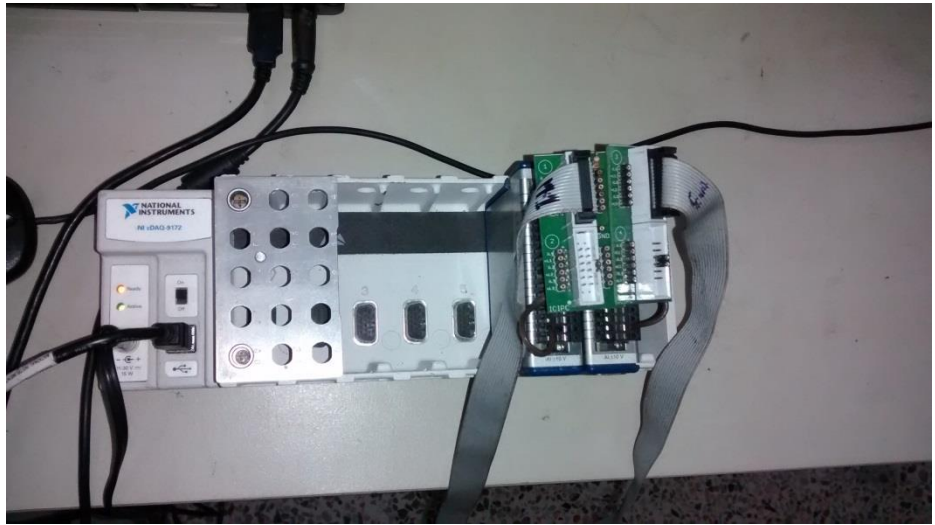


Figura 9. Módulos de adquisición de datos

- Software de captura de datos – LabView (National Instruments)[61]: Este tiene varios módulos programados para poder recepcionar y graficar los datos capturados en tiempo real de una manera entendible para los seres humanos, intentando simular un comportamiento análogo.
 - En el software LabView se pueden ver señales de voltaje, señales de amperaje y señales de potencia, como se muestra en la Figura 10.

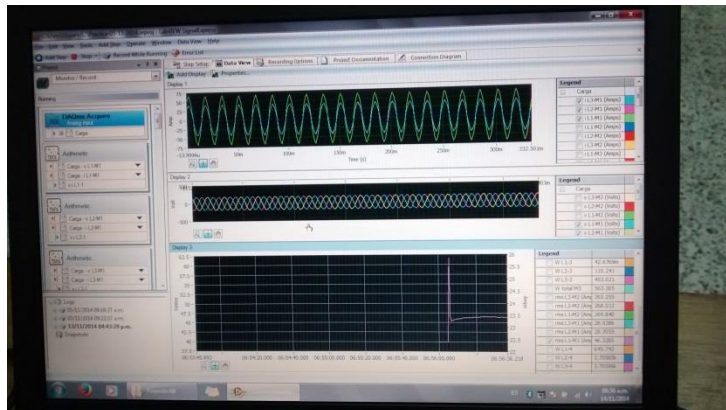


Figura 10. Software de captura de datos LabView.

- Como resultado final de la medición se obtiene una curva de demanda de potencia descrita por una serie de tiempo que se puede exportar a Excel, como se muestra en la Figura 11:

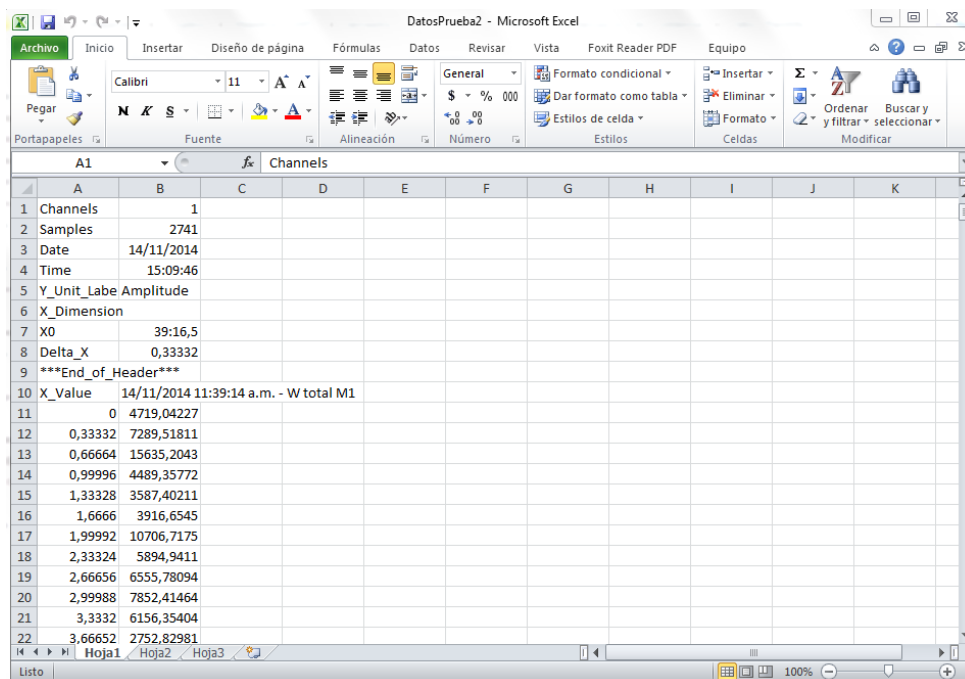


Figura 11. Serie de tiempo de la demanda de energía

7.1.1.2. Duración de las fases del ciclo

Los expertos que realizan las mediciones según las necesidades de las piezas que se van a inyectar, establecen los tiempos de referencia para cada ciclo y cada una de sus fases en las maquinas inyectoras, como se muestra en la Figura 12:

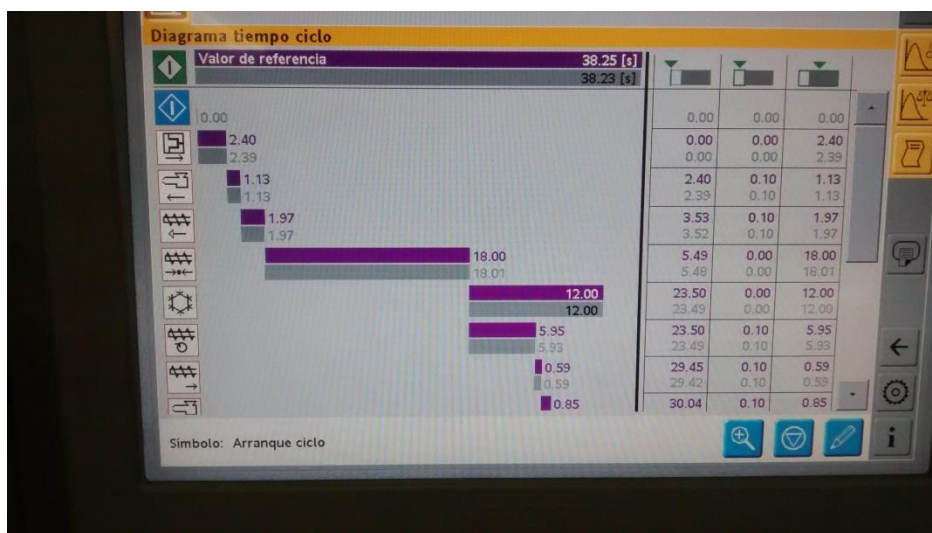


Figura 12. Diagrama de tiempos de ciclo

7.1.1.3. Características de la pieza inyectada

Otro de los factores de alta relevancia dentro de la medición del consumo de energía es la identificación de la pieza inyectada; es decir, la Información del peso total inyectado, el peso de cada pieza y el número de cavidades.

7.1.1.4. Desfase inicial

El desfase inicial es el periodo de tiempo en el cual el usuario establece que inicia la medición que se quiere analizar. En otras palabras, es una cantidad de datos que se descartan para el análisis. Tal cual como se muestra en la Figura 13 la zona de color rosa es la parte del desfase o la parte la cual el experto considera de poco valor para el análisis, mientras la parte verde son los datos que van a ser analizados.

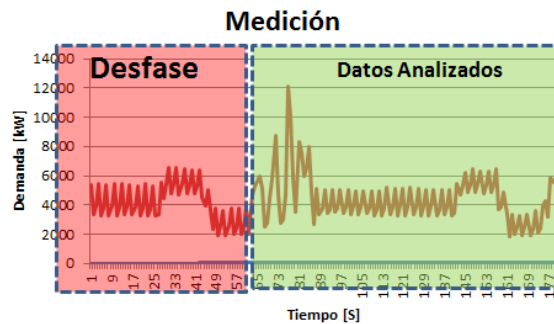


Figura 13. Desfase inicial establecido por el experto

7.2. Desarrollo del software

7.2.1. Visual Story Mapping

El desarrollo del software se encamina con base al Visual Story Map propuesto en la metodología (Figura 14).



Figura 14. VSM

7.2.2. Release 0

7.2.2.1. Sprint 1

- **Carga de datos:**

Para la carga de datos fue necesario construir y estructurar unas clases básicas, como se muestra en la Figura 15, que concentrarán los parámetros principales del software y que además pudiera contener los métodos que realizarán las operaciones necesarias para los cálculos de consumo posteriores. Esto con la intención de serializarlas y poder fácilmente trasladar los objetos creados a partir de éstas a una estructura XML.

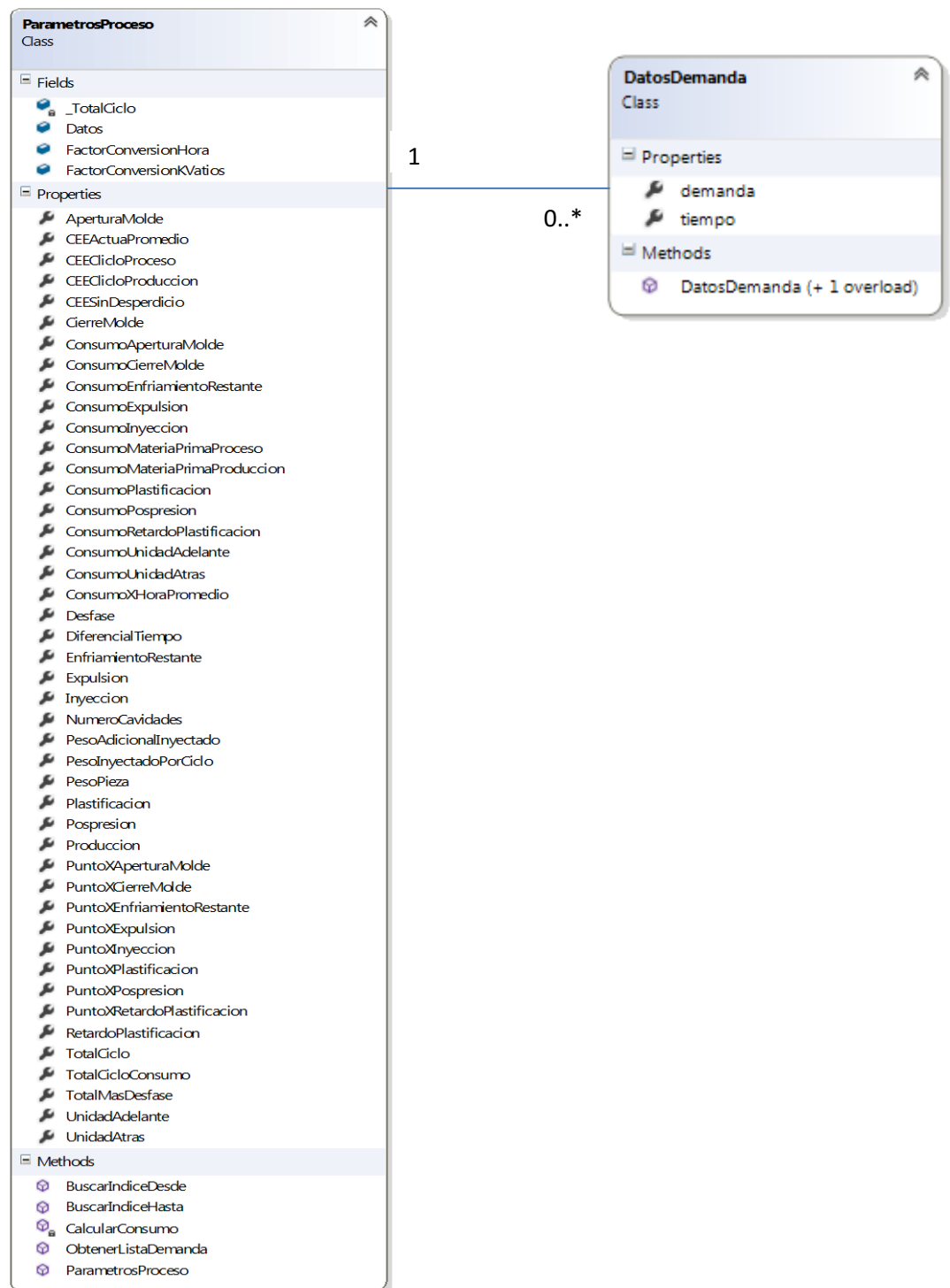
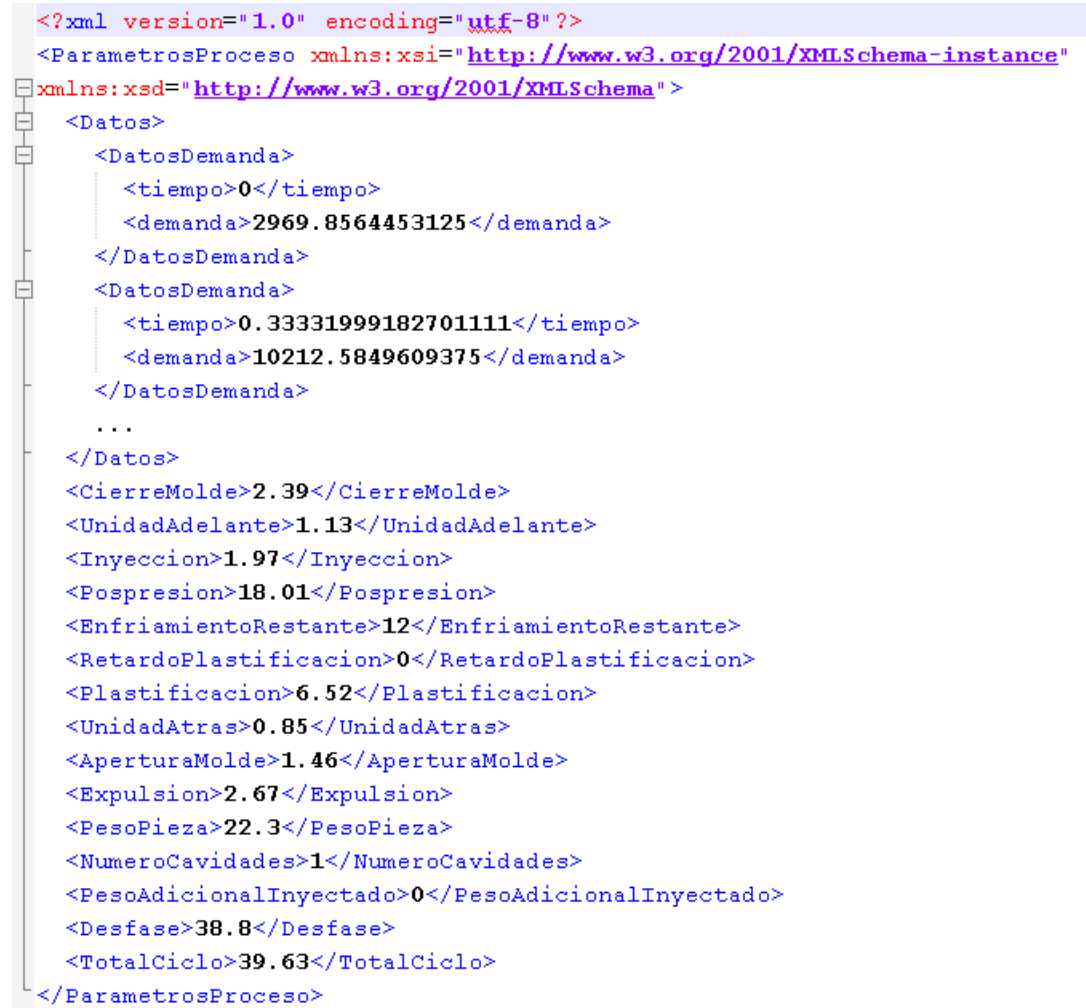


Figura 15. Clases principales

Cada vez que se cargan datos y se complementan con los datos principales del software quedan almacenados para su uso en una estructura XML, como se muestra en la Figura 16



```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<ParametrosProceso xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" >
  <Datos>
    <DatosDemanda>
      <tiempo>0</tiempo>
      <demanda>2969.8564453125</demanda>
    </DatosDemanda>
    <DatosDemanda>
      <tiempo>0.33331999182701111</tiempo>
      <demanda>10212.5849609375</demanda>
    </DatosDemanda>
    ...
  </Datos>
  <CierreMolde>2.39</CierreMolde>
  <UnidadAdelante>1.13</UnidadAdelante>
  <Inyeccion>1.97</Inyeccion>
  <Pospresion>18.01</Pospresion>
  <EnfriamientoRestante>12</EnfriamientoRestante>
  <RetardoPlastificacion>0</RetardoPlastificacion>
  <Plastificacion>6.52</Plastificacion>
  <UnidadAtras>0.85</UnidadAtras>
  <AperturaMolde>1.46</AperturaMolde>
  <Expulsion>2.67</Expulsion>
  <PesoPieza>22.3</PesoPieza>
  <NumeroCavidades>1</NumeroCavidades>
  <PesoAdicionalInyectado>0</PesoAdicionalInyectado>
  <Desfase>38.8</Desfase>
  <TotalCiclo>39.63</TotalCiclo>
</ParametrosProceso>
```

Figura 16. Estructura XML de los datos del sistema

■ Gráfico de demanda

Con los datos de la medición de energía cargados en el sistema, más los datos de la duración del ciclo de inyección, características de la pieza inyectada y un desfase inicial, se desarrolló una interfaz gráfica con la cual se pueda mostrar un gráfico de la demanda de potencia en kW contra el tiempo, como se muestra en la Figura 17

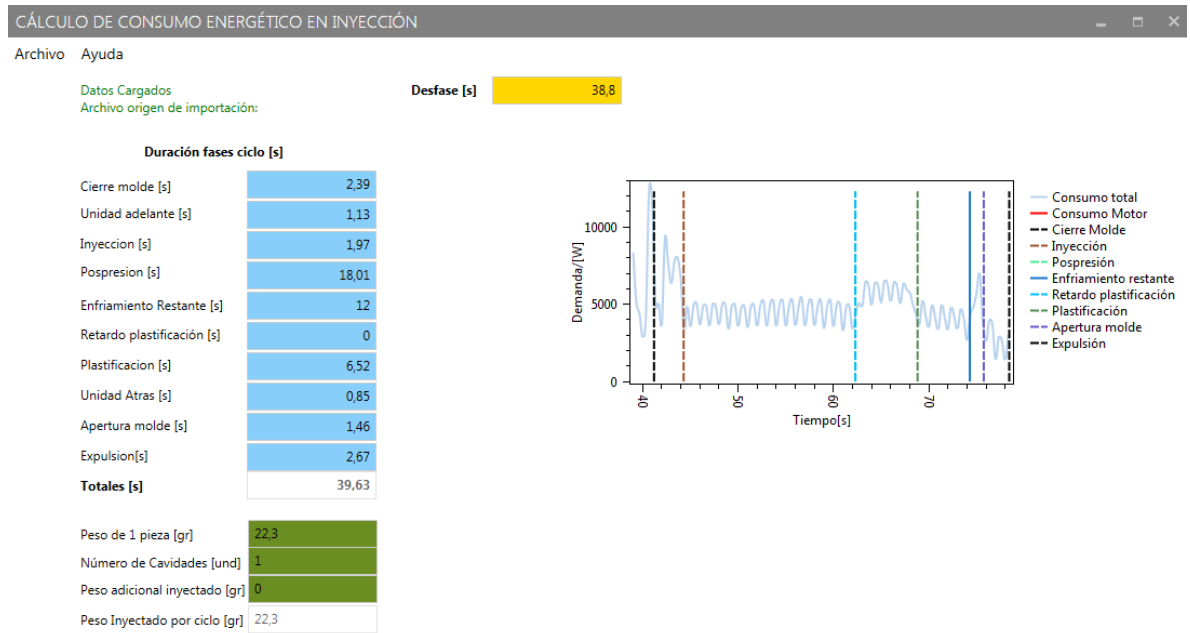


Figura 17. Gráfica de demanda vs tiempo

■ Comparación de ciclos por sobre-posición

Teniendo los datos cargados y los parámetros iniciales diligenciados, se desarrolla una funcionalidad en la que los expertos sobreponen ciclos de inyección y de esta manera observan si la medición fue consistente, como se muestra en la Figura 18.

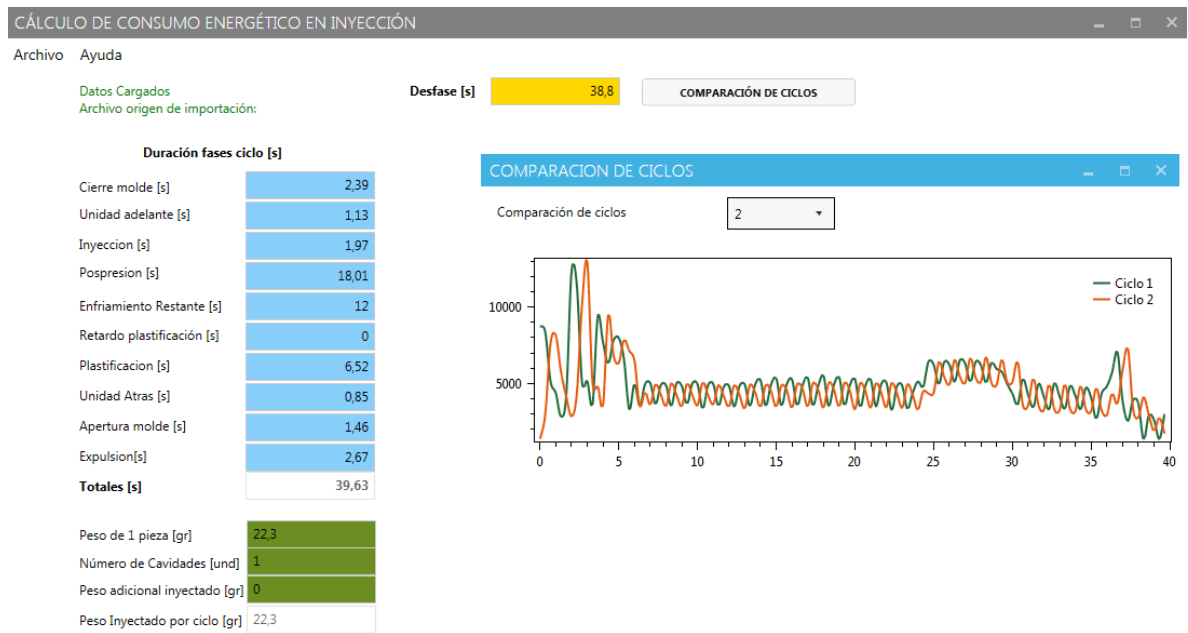


Figura 18. Comparación de ciclos por sobre-posición

7.2.2.2. Sprint 2

■ Cálculo de consumo/hora Total:

Partiendo de los datos de demanda en la serie de datos que se está analizando, se realiza el cálculo del consumo de energía entre ciertos rangos de tiempo que son cada una de las fases del ciclo de inyección y poder determinar cuánto es el consumo en cada una de ellas, como se muestra en la Figura 19.

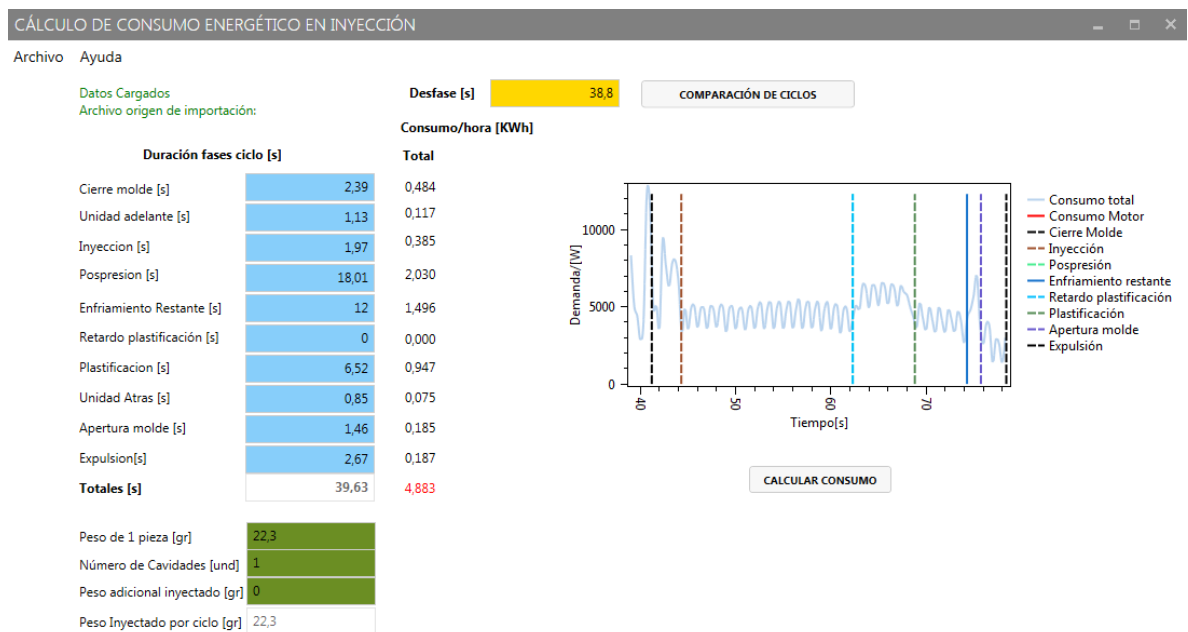


Figura 19. Resultados del cálculo de consumo/hora [kWh]

■ **Mostrar resultados de consumo promedio y por ciclo:**

En las funcionalidades desarrolladas en los sprints anteriores no se tenían en cuenta los datos de las piezas, como el número de cavidades, el peso y el peso adicional inyectado. En esta funcionalidad se calculan los consumos, teniendo en cuenta estos criterios, arrojando datos de consumos específicos bastante relevantes para los expertos, como se muestra en la Figura 20.

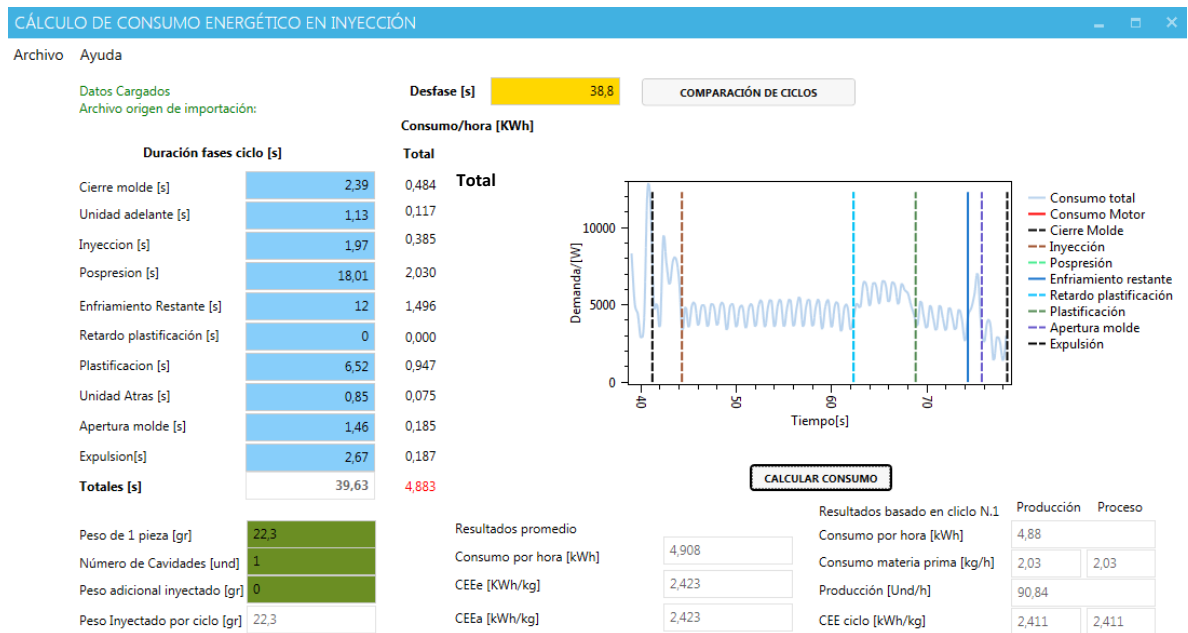


Figura 20. Resultados de consumos promedios y por ciclo

■ Cálculo de consumo / hora Parcial:

De una manera similar a la funcionalidad anterior, pero con la diferencia de que se parte de una fuente de datos diferente, se realiza el cálculo del consumo de energía parcial, que por lo general, es el consumo de energía del motor, que se realiza entre ciertos rangos de tiempo o fases del ciclo de inyección, para luego poder determinar cuánto es el consumo en cada una de ellas, como se muestra en la Figura 21.

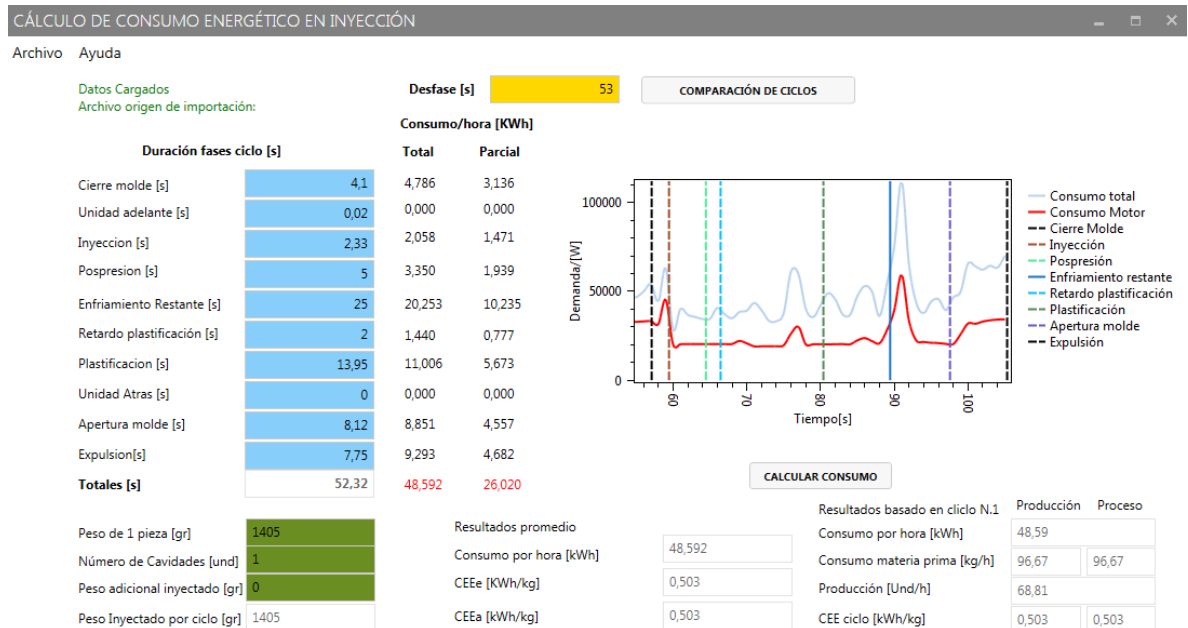


Figura 21. Cálculo del consumo parcial

7.2.3. Relase 1

7.2.3.1. Sprint 1

■ Estabilidad por autocorrelación:

La función de autocorrelación se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma. En el análisis del consumo energético en la inyección de polímeros ayuda a evaluar mediante la búsqueda de patrones repetitivos, qué tan consistente fue toda la medición.

Aplicando la autocorrelación a las mediciones de consumo energético en diferentes procesos de inyección, se puede observar, como se muestra en la Figura 22 y la Figura 23 que las mediciones fueron consistentes, mientras lo observado en la Figura 24 muestra una medición poco consistente, con un comportamiento descendente en su autocorrelación.

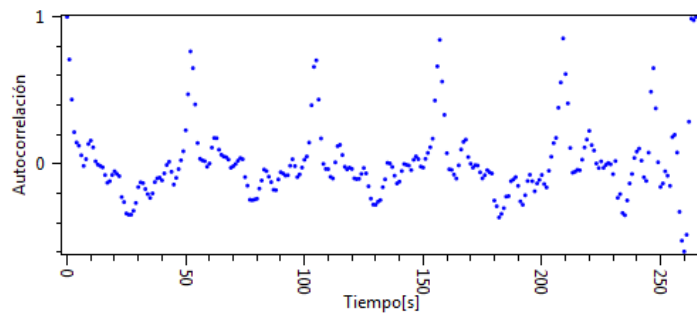


Figura 22. Análisis de Autocorrelación 1

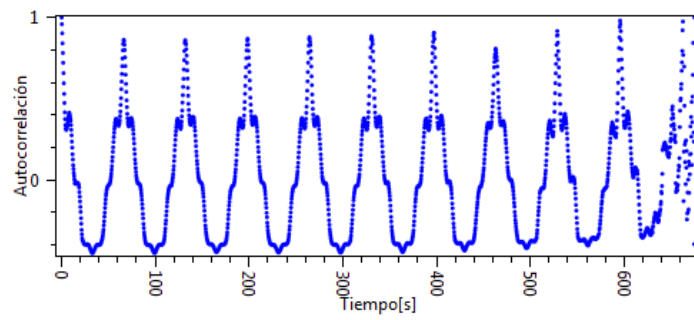


Figura 23. Análisis de Autocorrelación 2

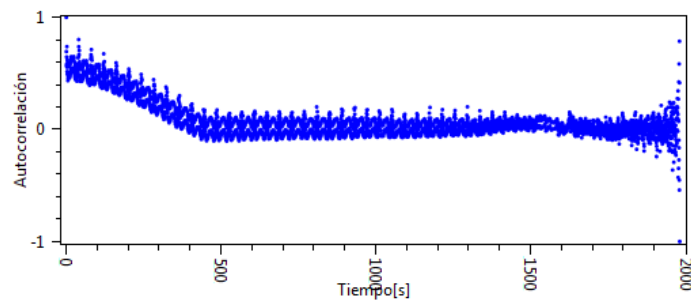


Figura 24. Análisis de Autocorrelación 3

Este módulo fue adicionado al sistema, como se muestra en la Figura 25.

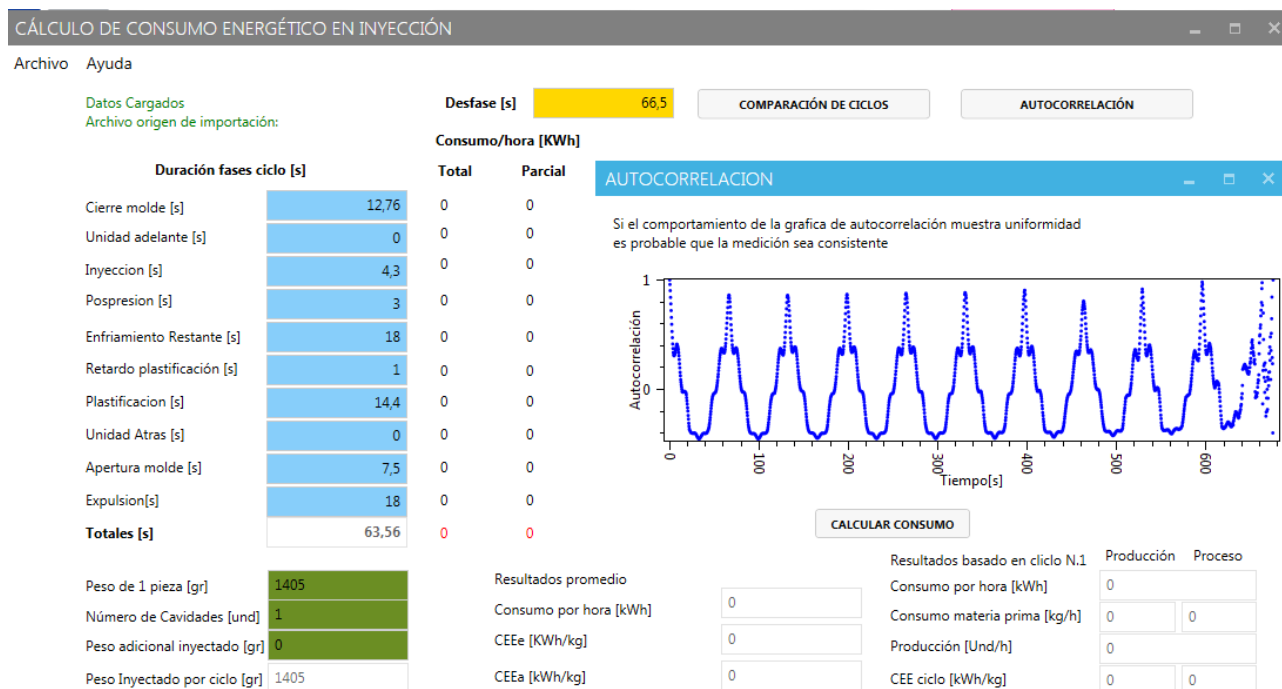


Figura 25. Módulo de autocorrelación en el sistema

7.2.3.2. Sprint 2

■ **Análisis del HMM:**

Este es un modelo estadístico ampliamente aplicado para el reconocimiento de patrones, tales como el reconocimiento del habla o de gestos. En el caso del consumo energético en la inyección de polímeros, podría aplicarse para reconocer todos los posibles comportamientos de las fases de un ciclo de inyección en la curva de demanda, debido a que estos tienen patrones que en principio podrían ser reconocibles. Sin embargo, este modelo no pudo ser utilizado en la herramienta debido a que el comportamiento del consumo energético en cada fase de un ciclo de inyección puede variar considerablemente por múltiples factores, como el tipo de máquina, los parámetros para cada proceso en particular (tiempos, cantidades de material, entre otros), materiales, moldes, regulación de la temperatura del molde y elementos adicionales, como secadores, robots, entre otros.

En la Figura 26, Figura 27 y Figura 28, se observa qué tan diferente puede ser el comportamiento del consumo de energía en el ciclo de inyección, teniendo en cuenta la máquina, el material, el peso y espesor promedio de las piezas.

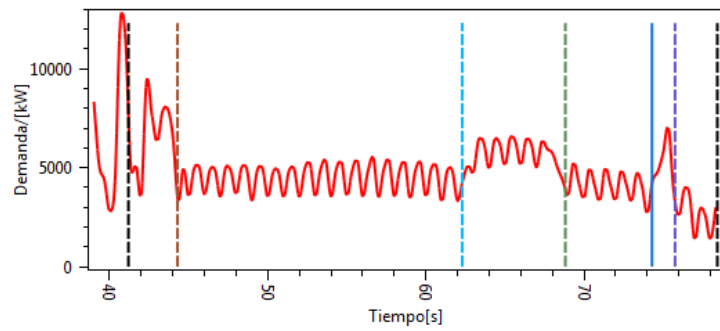


Figura 26. Comportamiento del consumo en máquina: Arburg-100Toneladas, Material: Polipropileno, Peso de la pieza: 22.3 g, Espesor: 3.8mm

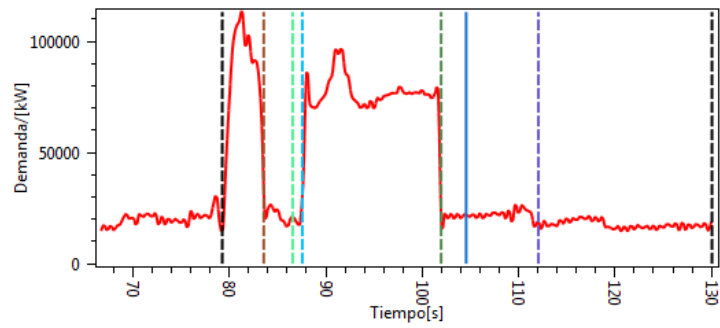


Figura 27. Comportamiento del consumo en máquina: LienYu-850Toneladas, Material: Poliestireno Cristal, Peso de la pieza: 1405 g, Espesor: 2.5mm

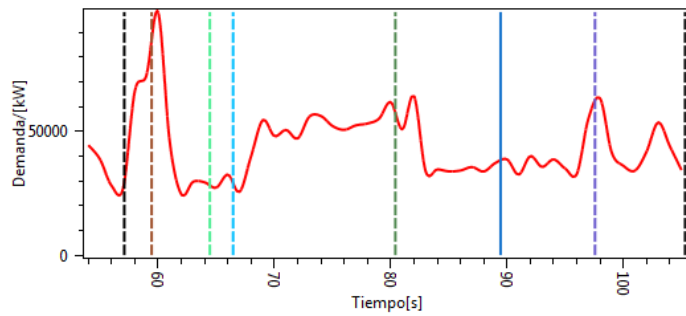


Figura 28. Comportamiento del consumo en máquina: KrausMaffei-700Toneladas, Material: Poliestireno Cristal, Peso de la pieza: 732 g (2 cavidades), Espesor: 2.5mm

7.2.4. Release 2

7.2.4.1. Sprint 1

■ Ineficiencia por correlación:

La correlación es la medida que permite cuantificar qué tan similares son las diferentes señales. Para este contexto se encontró que con la ayuda de la correlación se puede obtener un indicador de diferencias de energía consumida o contribución a la ineficiencia.

Al realizar la medición de consumo energético en la inyección, inicialmente se efectúa la selección del primer ciclo significativo, este ciclo se desplaza durante toda la medición calculando su correlación. Cuando se ubican los valores más altos se puede establecer que comienza otro ciclo similar. La diferencia entre el final del ciclo evaluado con el inicio del siguiente suponen un espacio de tiempo donde la máquina probablemente estuvo consumiendo energía sin estar produciendo, lo cual podría expresarse como ineficiencia.

Esta funcionalidad fue adicionada al sistema, como se muestra en la Figura 29.

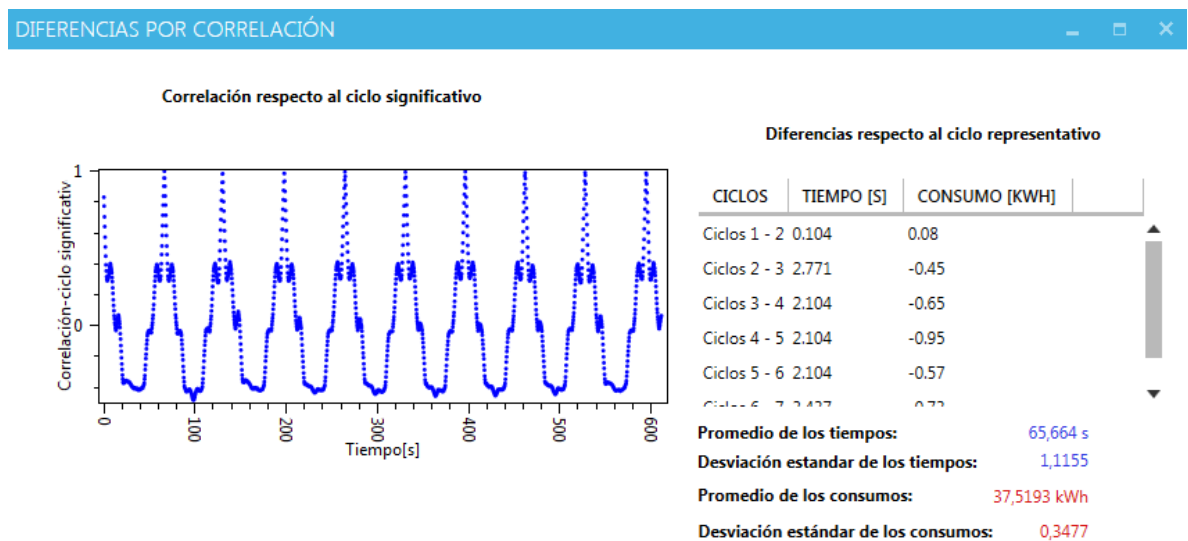


Figura 29. Ineficiencia por correlación

7.2.4.2. Sprint 2

■ Curva promedio y desviación estándar:

La curva promedio sirve para mejorar el análisis de la consistencia de las mediciones entre los ciclos, se compara un ciclo determinado frente al promedio, mediante la correlación para identificar qué tan similares son sus comportamientos y así ayudarles a los expertos con sus conclusiones frente a las mediciones (Figura 30).

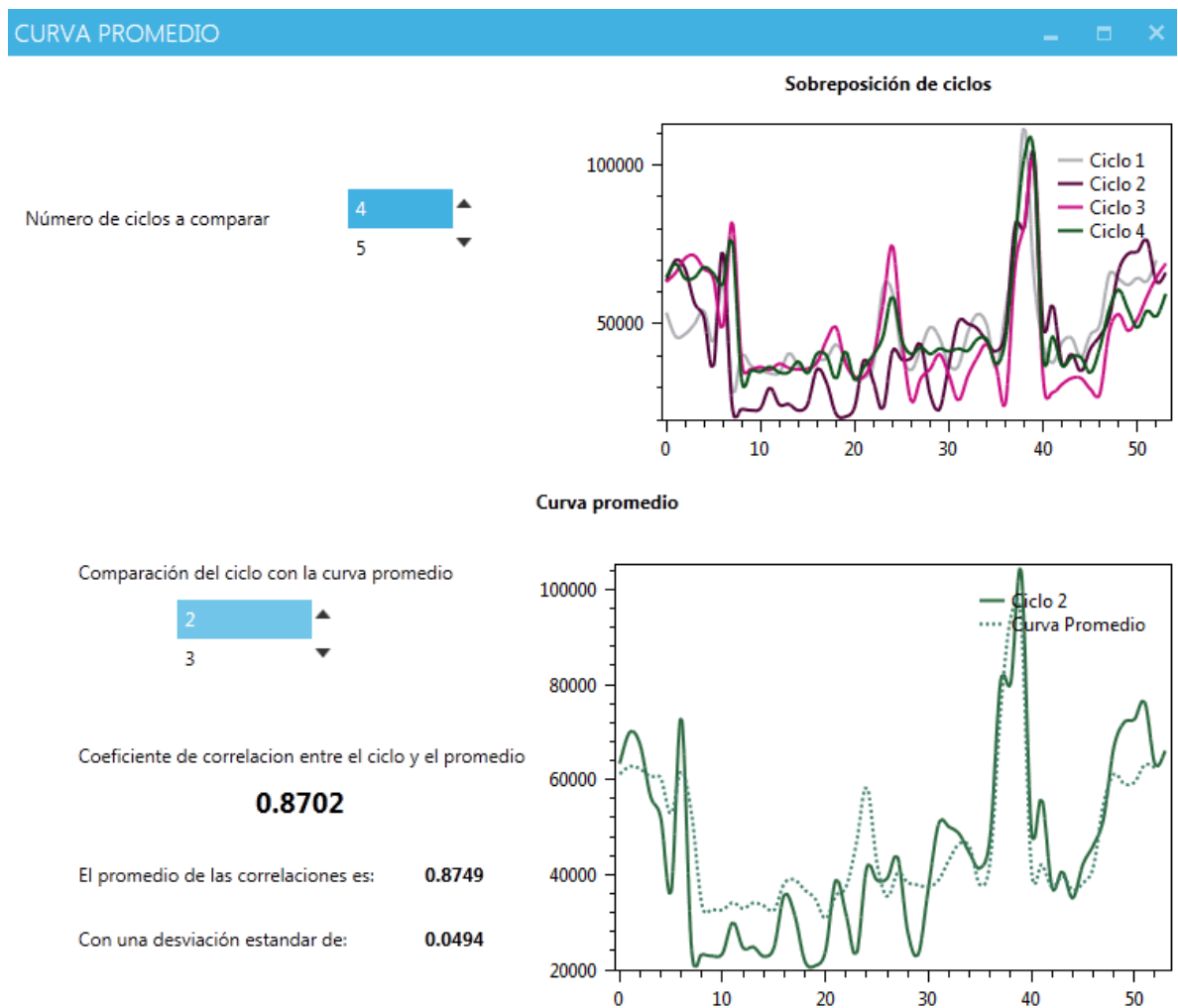


Figura 30. Curva promedio

8. Resultados y discusión

8.1. Resultados en la identificación de problemas en el análisis de datos de consumo energético en el proceso de inyección

En un proceso de medición de consumo energético en inyección, según los expertos, después de tener el proceso estable, típicamente se mide el consumo energético de 5 hasta máximo 10 ciclos. Es importante resaltar que en estos procesos se pueden medir tanto el consumo del motor, como la calefacción, además, dependiendo de la máquina, se puede medir el consumo del Robot, y finalmente, se puede calcular el consumo total que reúne los elementos anteriores. Pero también es importante destacar que muchas veces los ciclos de inyección no son automatizados, pues se pueden encontrar procesos en los cuales hay intervención humana, por ejemplo, durante la expulsión de la pieza del molde.

8.1.1. En la fase de medición

Cuando se visualizan comportamientos anormales durante las mediciones, la principal herramienta para ese monitoreo son los gráficos del software LabView. Al registrarse comportamientos anómalos, las posibles causas de éstos pueden ser:

- Las conexiones erradas de las pinzas o su orientación incorrecta
- La falta o inadecuada calibración de los equipos
- El mal estado de los módulos
- La inadecuada elección de escalas de la medición en el software

8.1.2. En la fase de análisis

Después de tener los datos de demanda del proceso que se está analizando, se halló que durante esta fase posterior existen anomalías y suposiciones que pueden llegar a afectar la calidad del análisis.

- Se ha identificado como problema para analizar los datos de consumo energético en el presente proceso, el desfase entre los ciclos de inyección, debido a que este parámetro no se contempla y afecta los indicadores de consumo efectivo en el procedimiento, generando mediciones imprecisas. Dichos desfases se dan por ejemplo, cuando la extracción de la pieza es manual; en cambio, cuando el sistema es automático, el desfase prácticamente no existe. Actualmente el análisis se hace suponiendo una operación automática.

- En los análisis que realiza el ICIPC actualmente, no se cuenta con una curva promedio que incluya la desviación en las mediciones de consumo energético para los diferentes ciclos analizados. La ausencia de esta curva promedio no permite evaluar la ineficiencia de una operación no automática con diferentes desfases entre ciclos.
- El análisis de un proceso de transformación de plásticos puede tomar mucho más tiempo del que se espera, debido a que se debe realizar su observación en un estado estable.
- Una análisis poco considerado por los expertos es el que se puede realizar a largo plazo, con la intención de indentificar cambios en los patrones de comportamiento, como durante los cambios de turnos u horas del día.

8.1.3. Esquema base para el desarrollo

Con base en las necesidades del sector de polímeros expuestas en el estado del arte y en los problemas identificados en la fase de análisis realizado por parte del Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC), se propone el esquema de la Figura 31, que esboza los parámetros de entrada, el análisis que se requiere y los resultados que esperan, como base para el desarrollo de una herramienta computacional, que apoyada en la teoría de la información puede ayudar a la mejora de la calidad de la información del consumo energético del proceso de inyección.

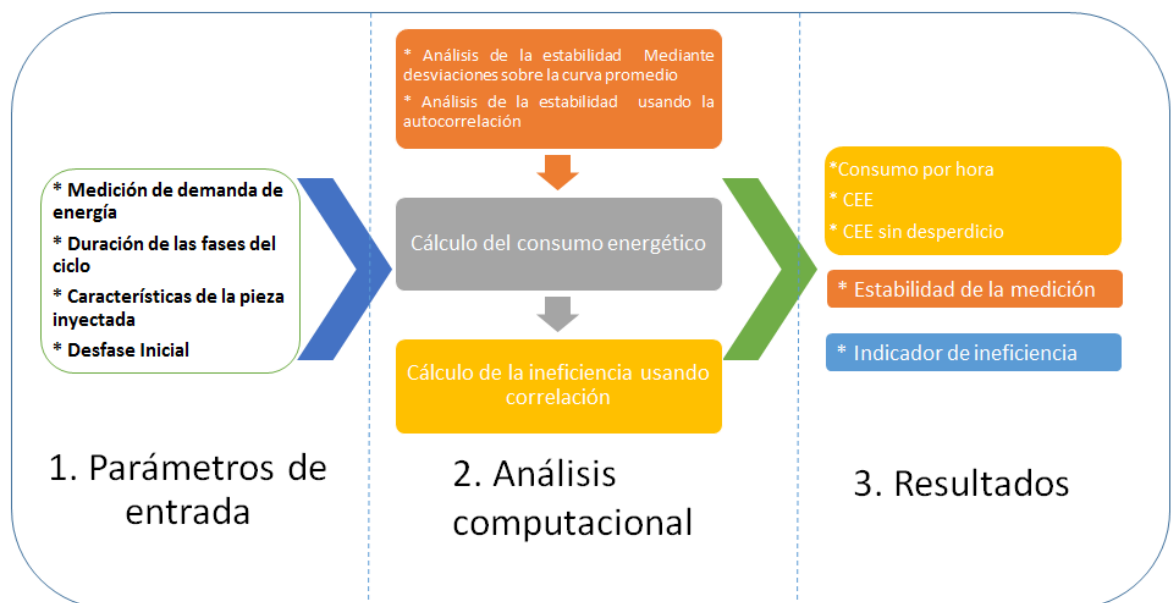


Figura 31. Esquema del modelo propuesto

8.2. Resultado del desarrollo de software para el análisis de consumo energético en el proceso de inyección

En la Figura 32 se observa el software desarrollado que muestra indicadores importantes, como los cálculos de CEE, consumo por hora, consumos en la producción y proceso, a partir de unos parámetros de entrada, como los datos de las mediciones, la duración de las fases de un ciclo de inyección y el peso de la pieza, además de funcionalidades que con base a la teoría de la información apoyan el análisis de la información de consumo energético y facilitan la toma de decisiones de los expertos respecto a la mejora en la eficiencia energética del proceso de inyección de polímeros.

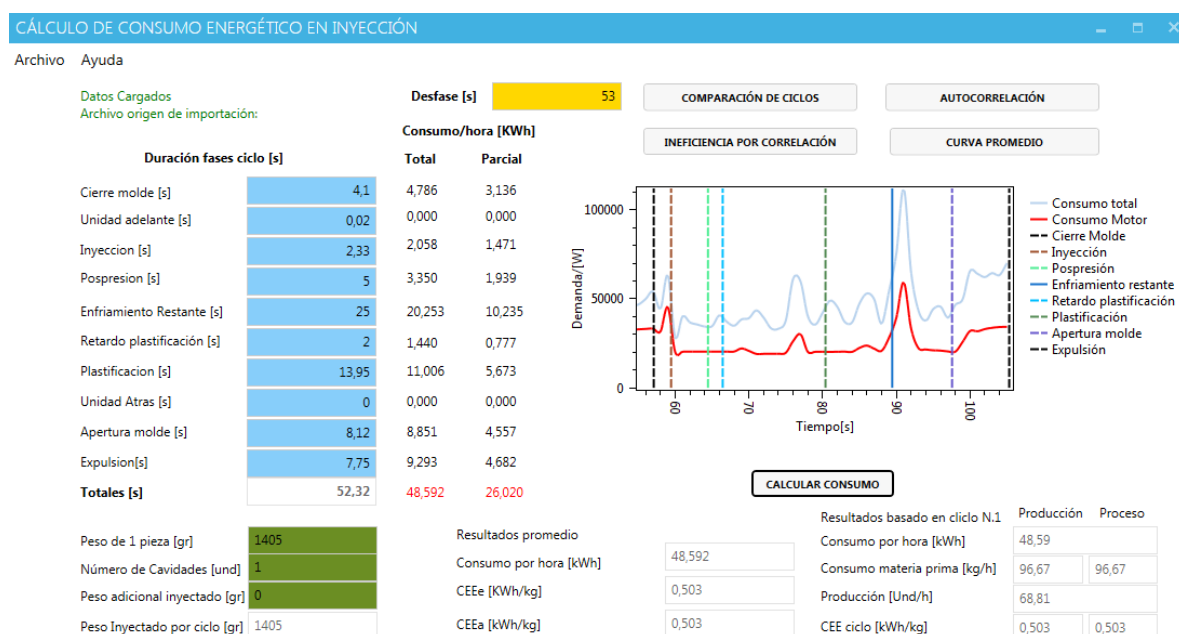


Figura 32. Pantalla principal del software desarrollado

8.3. Caso real de prueba

La inyectora Arburg– Allrounder 420C de 100 toneladas, ubicada en los laboratorios del ICIPC en Medellín, fue sometida a pruebas de consumo de energético de inyección mientras procesaba piezas de polipropileno, de pesos de 22.3 g y de espesores de 3.8 mm, arrojando los resultados que se muestran en la Figura 33 que se expresan en una gráfica de demanda vs tiempo.

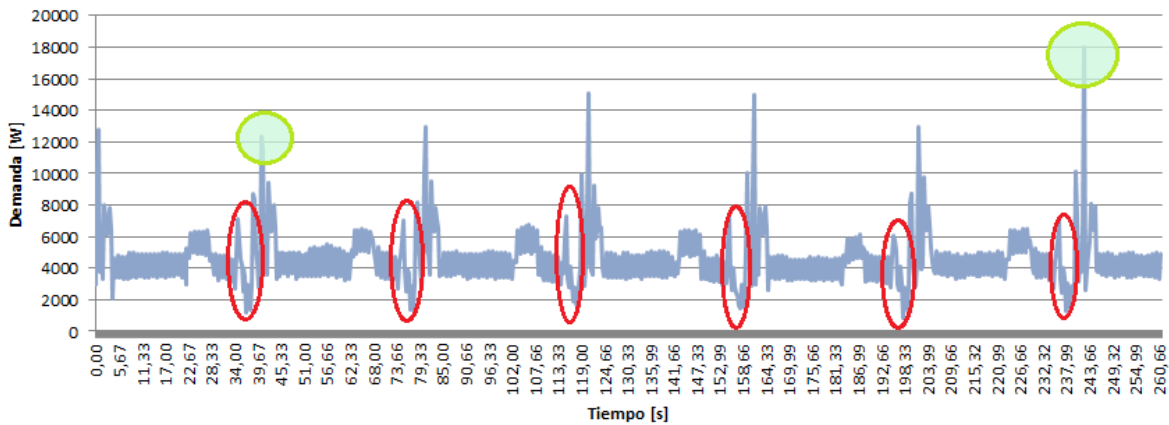


Figura 33. Identificación de anomalías en las mediciones

Como se puede apreciar en la Figura 33, en los sectores señalados con rojo, se pueden notar cambios en el comportamiento normal de un ciclo de inyección y además se logra identificar las diferencias en los picos de consumos de los ciclos y su falta de regularidad, situación que se resalta en los sectores delimitados con verde.

Al pasar estos datos por el aplicativo en su módulo de curva promedio, se puede evidenciar que si el proceso se cumpliera de una manera cíclica perfecta la curvas analizadas se superpondrían perfectamente y además si se sacara un promedio de la las mismas y se comparara con cualquiera de los ciclos debería existir una desviación mínima, situación que no se evidenció en el ejercicio, como se muestra en la Figura 34

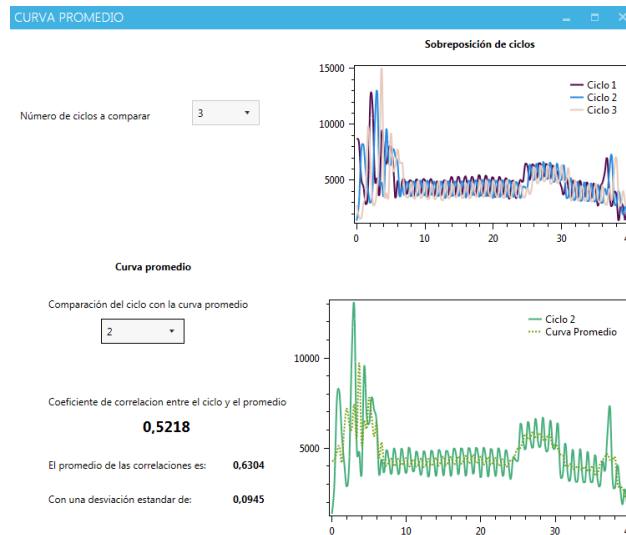


Figura 34. Ejercicio sometido al módulo de "Curva promedio"

A continuación el ejercicio fue evaluado en el módulo de autocorrelación en el cual se pudo evidenciar que la estabilidad de la medición fue decreciendo durante los primeros momentos de la prueba hasta llegar a valores muy bajos de autocorrelación donde se estabilizó el proceso (Figura 35).

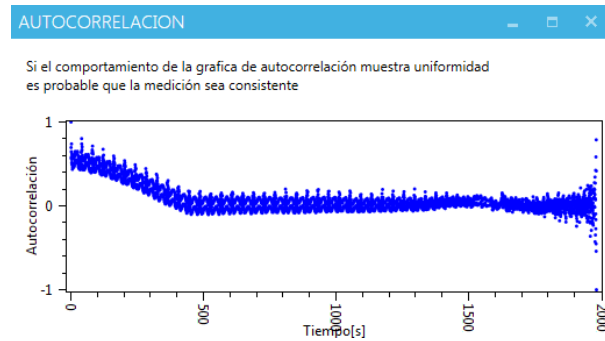


Figura 35. Ejercicio sometido al módulo de "Autocorrelación"

Finalmente los datos se someten al módulo de diferencia por correlación en el cual se evidencia que el ciclo significativo presenta diferencias tanto en tiempos como en consumo respecto a los otros ciclos del proceso evaluado (Figura 36)

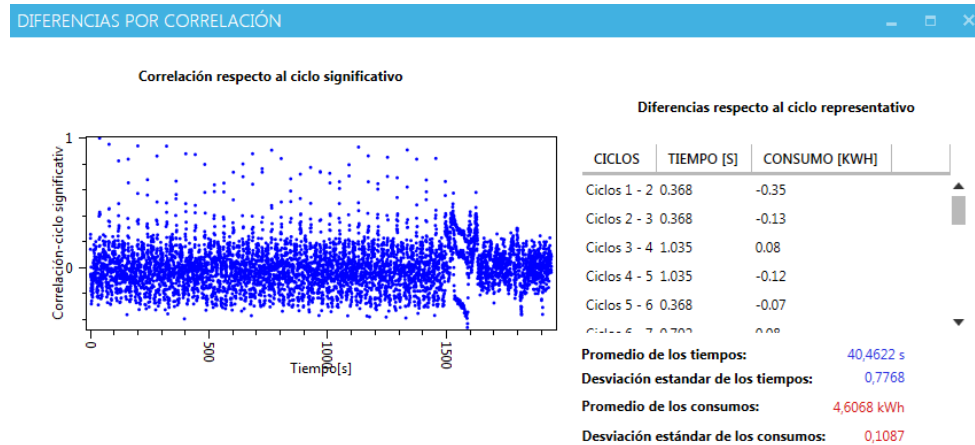


Figura 36. Ejercicio sometido al módulo de "Diferencias por correlación"

Los datos obtenidos en el software ofrecen una visión solida basada en cálculos según el comportamiento de los datos analizados, que mejoran la probabilidad de tomar decisiones que podrían conllevar a la mejora del proceso a nivel de consumo energético.

9. Conclusiones

- Con el desarrollo de este trabajo mediante el uso de herramientas de la teoría de la información se logró establecer las variabilidades entre ciclos de inyección de polímero, lo que representa la posibilidad de mejora energética.
- También posibilita evaluar el tiempo que demorará un proceso para estabilizarse energéticamente, pudiendo identificar patrones en el largo plazo, como cambios de turnos u horas del día.
- Se desarrolló la herramienta computacional para la medición del consumo energético del proceso de inyección de polímeros, que además de proveer los cálculos de los consumos específicos en los procesos, facilita el análisis de la estabilidad de las mediciones y ofrece indicadores de ineficiencia.
- El trabajo desarrollado permitió contribuir al análisis de datos involucrados en el consumo energético en la inyección de plásticos, lo cual es útil para la toma de decisiones que mejoren la eficiencia en el proceso.

10. Trabajo Futuro

- Existen muchas herramientas de la teoría de la información y estadísticas aplicables a series de tiempo, como lo son los consumos energéticos en el proceso de inyección, por esto no se descarta la búsqueda de otras técnicas que puedan complementar el análisis de la calidad de los datos del consumo energético en el proceso de inyección.
- Es posible extender y aplicar este trabajo, con algunas modificaciones, a otros procesos de transformación de polímeros.

11. Referencias

- [1] A. Naranjo Carvajal, "Ecoeficiencia en el uso de energía en la industria de plásticos," *Tecnología del plástico*, 2012.
- [2] C. Vargas, J. Posada, L. Jaramillo, and L. García, "Consumos de energía en la industria del plástico: Revisión de estudios realizados," *Revista CEA*, vol. 1, p. 15, 2014.
- [3] E. I. Administration. (2015, 2015-03-01). *How much energy is consumed in the world by each sector?* Available: <http://www.eia.gov/tools/fags/faq.cfm?id=447&t=3>
- [4] Q. Wang, F. Liu, and C. Li, "An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop," *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 122-133, 8/1/ 2013.
- [5] J. Madan, M. Mani, J. H. Lee, and K. W. Lyons, "Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study," *Journal of Cleaner Production*, 2014.
- [6] R. Calvo, R. Domingo, and M. A. Sebastin, "Systemic criterion of sustainability in agile manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 46, pp. 3345-3358, 2008.
- [7] N. Y. Lu, G. X. Gong, Y. Yang, and J. H. Lu, "Multi-objective process parameter optimization for energy saving in injection molding process," *Journal of Zhejiang University: Science A*, vol. 13, pp. 382-394, 2012.
- [8] I. D. Lopez Gomez and A. Naranjo Carvajal, "Metodología para la optimización energética del proceso de inyección (parte 1)," *Tecnología del plástico*, 2014.
- [9] I. D. Lopez Gomez, A. Naranjo Carvajal, and S. Suarez, "Metodología para la optimización energética del proceso de inyección (parte 2)," *Tecnología del plástico*, 2015.
- [10] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 5, pp. 3-55, 2001.
- [11] D. Marculescu, R. Marculescu, and M. Pedram, "Information theoretic measures of energy consumption at register transfer level," presented at the Proceedings of the 1995 international symposium on Low power design, Dana Point, California, USA, 1995.
- [12] G. P. R. Filho, J. Ueyama, L. A. Villas, A. R. Pinto, V. P. Gonçalves, G. Pessin, *et al.*, "NodePM: A Remote Monitoring Alert System for Energy Consumption Using Probabilistic Techniques," *ebscohost*, 2014.
- [13] C. Novoa, C. Rojas, C. Cano, L. Rincon, F. Sanz, O. Caicedo, *et al.* (2009). *Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector de plásticos*. Available: <http://es.scribd.com/doc/131722027/600-Guia-Metodologica-Plasticos#scribd>
- [14] J. Silva and O. Porras, "Situación energética general del sector de los plásticos en Bogotá," *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, 2000.
- [15] J. Colbert. (2005). *A RECIPE for energy management* (<http://www.eurecipe.com/>).
- [16] A. Thiriez and T. Gutowski, "An Environmental Analysis of Injection Molding," in *Electronics and the Environment, 2006. Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 195-200.
- [17] F. Associates, "Life Cycle Inventory of Plastic Fabrication Processes: Injection Molding and Thermoforming," pp. 19-25, 2011.

- [18] K.-F. Pun, I.-K. Hui, W. G. Lewis, and H. C. W. Lau, "A multiple-criteria environmental impact assessment for the plastic injection molding process: a methodology," *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, pp. 41-49, 2// 2003.
- [19] Y. Seow and S. Rahimifard, "A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 4, pp. 258-264, // 2011.
- [20] C. Herrmann, S. Thiede, S. Kara, and J. Hesselbach, "Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 45-48, // 2011.
- [21] A. Kanungo and E. Swan, "All electric injection molding machines: how much energy can you save?," *Proceedings from the Thirtieth Industrial Energy Technology Conference. New Orleans, LA*, 2008.
- [22] W. Li, A. Zein, S. Kara, and C. Herrmann, "An investigation into fixed energy consumption of machine tools," in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2011, pp. 268-273.
- [23] A. Zein, W. Li, C. Herrmann, and S. Kara, "Energy efficiency measures for the design and operation of machine tools: An axiomatic approach," in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2011, pp. 274-279.
- [24] R. Schmitt, J. L. Bittencourt, and R. Bonefeld, "Modelling machine tools for self-optimisation of energy consumption," in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2011, pp. 253-257.
- [25] N. Weinert, S. Chiotellis, and G. Seliger, "Methodology for planning and operating energy-efficient production systems," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 41-44, 2011.
- [26] O. I. Avram and P. Xirouchakis, "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 699-711, 2011.
- [27] A. Cannata, S. Karnouskos, and M. Taisch, "Energy efficiency driven process analysis and optimization in discrete manufacturing," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2009, pp. 4449-4454.
- [28] T. Devoldere, W. Dewulf, W. Deprez, B. Willems, and J. R. Duflou, "Improvement potential for energy consumption in discrete part production machines," in *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses - Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2007, pp. 311-316.
- [29] G. Mouzon, M. B. Yildirim, and J. Twomey, "Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment," *International Journal of Production Research*, vol. 45, pp. 4247-4271, 2007.
- [30] F. Qureshi, W. Li, S. Kara, and C. Herrmann, "Unit Process Energy Consumption Models for Material Addition Processes: A Case of the Injection Molding Process," in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, D. A. Dornfeld and B. S. Linke, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 269-274.
- [31] E. Giaccone and S. Mancò, "Energy efficiency measurement in industrial processes," *Energy*, vol. 38, pp. 331-345, 2// 2012.

- [32] I. Ribeiro, P. Peças, and E. Henriques, "Assessment of Energy Consumption in Injection Moulding Process," in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, D. A. Dornfeld and B. S. Linke, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 263-268.
- [33] A. Weissman, A. Ananthanarayanan, S. K. Gupta, and R. D. Sriram, "A systematic methodology for accurate design-stage estimation of energy consumption for injection molded parts," in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2010, pp. 525-536.
- [34] S. Rahimifard, Y. Seow, and T. Childs, "Minimising embodied product energy to support energy efficient manufacturing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 25-28, 2010.
- [35] U. Götze, H. J. Koriath, A. Kolesnikov, R. Lindner, and J. Paetzold, "Integrated methodology for the evaluation of the energy- and cost-effectiveness of machine tools," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 5, pp. 151-163, 2012.
- [36] P. C. Bolur, "A Guide to Injection Moulding of Plastics. PLASTICATING (<http://www.pitfallsinmolding.com/plasticatingpage.html>)," 2007.
- [37] T. A. Osswald and J. P. Hernández-Ortiz, "Polymer Processing," in *Polymer Processing*, T. A. Osswald and J. P. Hernández-Ortiz, Eds., ed: Hanser, 2006, pp. i-xxvii.
- [38] T. Peng and X. Xu, "Energy-efficient machining systems: A critical review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, pp. 1389-1406, 2014.
- [39] S. V. Labs. (2015, 2015-03-23). *Electronics & Communications - Signals and Systems Laboratory - Analysis of LTI system response*. Available: <http://iitg.vlab.co.in/?sub=59&brch=166&sim=877&cnt=1609>
- [40] X. Yin, "Canonical correlation analysis based on information theory," *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 91, pp. 161-176, 11// 2004.
- [41] E. H. Linfoot, "An informational measure of correlation," *Information and Control*, vol. 1, pp. 85-89, 9// 1957.
- [42] Z. Zhang, K. T. McDonnell, E. Zadok, and K. Mueller, "Visual correlation analysis of numerical and categorical data on the correlation map," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 21, pp. 289-303, 2015.
- [43] Y. Zhou, Q. Zhang, V. Singh, and M. Xiao, "General correlation analysis: a new algorithm and application," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 29, pp. 665-677, 2015/03/01 2015.
- [44] P. Bourke, "Cross correlation," *Cross Correlation", Auto Correlation—2D Pattern Identification*, 1996.
- [45] J. C. Estefan, "Arquitectura de telecontrol de un robot mediante el uso de interfaces gestuales [recurso electrónico]," Universidad EAFIT, 2013.
- [46] T. Dybå and T. Dingsøyr, "Empirical studies of agile software development: A systematic review," *Information and Software Technology*, vol. 50, pp. 833-859, 8// 2008.
- [47] S. Nerur, R. Mahapatra, and G. Mangalaraj, "Challenges of migrating to agile methodologies," *Commun. ACM*, vol. 48, pp. 72-78, 2005.
- [48] A. Cockburn, *Crystal clear: a human-powered methodology for small teams*: Pearson Education, 2004.
- [49] M. Poppendieck and T. Poppendieck, "Lean Software Development: An Agile Toolkit for Software Development Managers," *Lean Software Development: An Agile Toolkit for Software Development Managers*, 2003.

- [50] C. Andres and K. Beck, "Extreme Programming Explained: Embrace Change," *Reading: Addison-Wesley Professional*, 2004.
- [51] A. Naranjo Carvajal, J. C. Eestefan Angel, and J. A. Betancur Mejia, "INYECTOOLS - Ciclo de inyección web," ed. CVLac- Colciencias: Grupo de Investigación Aplicada en Polímeros, 2014.
- [52] I. D. Lopez Gomez, J. C. Estefan Angel, and J. A. Betancur Mejia, "SafePack Software," ed. CVLac- Colciencias: Grupo de Investigación Aplicada en Polímeros, 2013.
- [53] I. D. Lopez Gomez, J. C. Estefan Angel, and J. A. Betancur Mejia, "Migrasoft: Software para garantizar la inocuidad de los empaques plásticos.," ed. CVLac- Colciencias: Grupo de Investigación Aplicada en Polímeros, 2012.
- [54] O. A. Estrada Ramirez, J. C. Estefan Angel, and J. A. Betancur Mejia, "Permeasoft Web," ed. CVLac- Colciencias: Grupo de Investigación Aplicada en Polímeros, 2012.
- [55] A. Naranjo Carvajal, J. C. Estefan Angel, and J. A. Betancur Mejia, "Plataforma Técnico Administrativa - PLATEA," ed. CVLac- Colciencias: Grupo de Investigación Aplicada en Polímeros, 2010.
- [56] M. Cooperation. (2015, 2015-04-21). *Visual Studio*. Available: <https://www.visualstudio.com/>
- [57] M. Radrigan, *Metodología de la investigación*, 2005.
- [58] Arburg. (2015, 2015-04-06). *Hydraulic Allrounder 570 C Golden Edition*. Available: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/presse/2011/18554-01_570c_ge.jpg
- [59] S. Biju, "Agile Software Development Methods and its Advantages," in *Technological Developments in Networking, Education and Automation*, K. Elleithy, T. Sobh, M. Iskander, V. Kapila, M. A. Karim, and A. Mahmood, Eds., ed: Springer Netherlands, 2010, pp. 603-607.
- [60] A. Moran, "Agile Software Development," in *Agile Risk Management*, ed: Springer International Publishing, 2014, pp. 1-16.
- [61] N. I. Corporation. (2015). <http://colombia.ni.com/>. Available: <http://colombia.ni.com/>

Anexo A. Manual de usuario

Software para el cálculo de consumo energético en inyección

Descripción

Este es un aplicativo Stand Alone que permite el análisis de consumo energético de inyección de polímeros, mediante la implementación de módulos que examinan el comportamiento energético basándose en los conceptos de correlación, cálculo de consumos, autocorrelación, comparación de ciclos, permitiendo identificar posibles mejoras en el proceso.

Tipo de licencia

El tipo de licencia considerado para esta herramienta es una Licencia para Usuario Final ("CUF") que constituye un acuerdo legal entre una persona física o persona jurídica y el INSTITUTO DE CAPACITACIÓN E INVESTIGACION DEL PLASTICO Y DEL CAUCHO, de aquí en adelante ICIPC. Al instalar, copiar o de otra manera utilizar el PRODUCTO SOFTWARE, usted acepta quedar obligado por los términos del CUF.

El PRODUCTO SOFTWARE está protegido por leyes y por tratados internacionales en materia de derechos de autor, así como por otras leyes y tratados sobre propiedad intelectual. El PRODUCTO SOFTWARE se concede en licencia y no se vende.

DERECHOS DEL ICIPC SOBRE EL SOFTWARE: El ICIPC, tiene la titularidad y derechos de autor con respecto al PRODUCTO SOFTWARE (incluyendo, pero sin limitarse a, imágenes, fotografías, animaciones, vídeo, audio, bases de datos, música, texto, subprogramas incorporados al PRODUCTO SOFTWARE). Así mismo los materiales impresos que lo acompañan y toda copia del PRODUCTO SOFTWARE son propiedad del ICIPC. El PRODUCTO SOFTWARE se encuentra protegido por leyes y disposiciones de tratados internacionales en materia de derechos de autor. Por consiguiente, usted deberá tratar el PRODUCTO SOFTWARE como cualquier otro material protegido por leyes de derechos de autor.

Uso del software

Este software inicia en una pantalla principal, y esta se compone de cuatro zonas: 1. Zona de menú, 2. Zona de parámetro de entrada, 3. Zona de resultados y 4. Zona de funcionalidades. Como se muestra en la Figura 37.

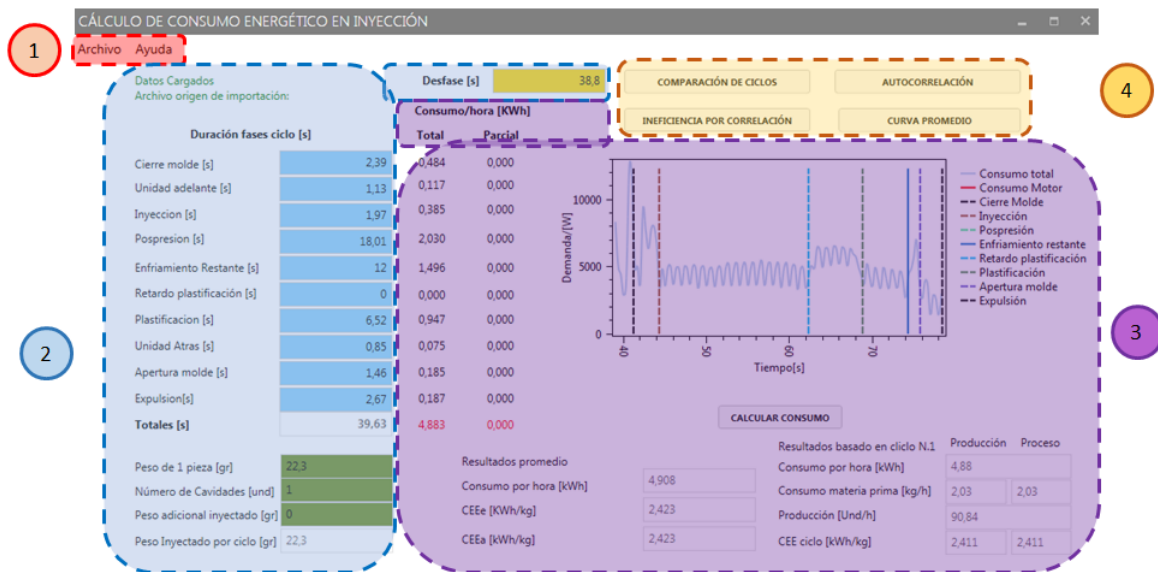


Figura 37. Zonas del software

1. Zona de menú

1.1. Archivo

El menú archivo muestra las siguientes opciones (Figura 38):

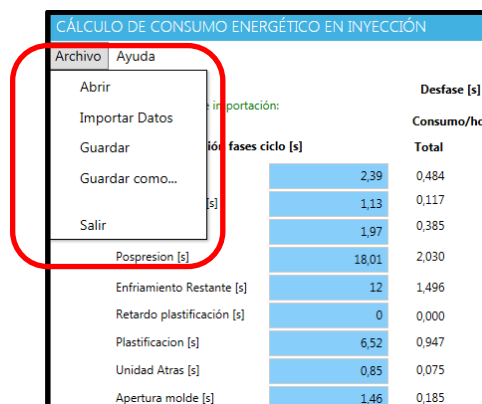


Figura 38. Opciones del menú "Archivo"

- **Abrir:** Al hacer clic en esta opción, se pueden abrir archivos propios del software (Estructura XML) que contienen todos los datos de un problema trabajado anteriormente y guardado en el software.
- **Importar Datos:** Al hacer clic en esta opción, se pueden abrir archivos de Excel que almacenan los datos de consumo en hojas de cálculo con 2 columnas: Tiempo y Demanda.
- **Guardar:** Al hacer clic sobre esta opción, se pueden guardar cambios sobre un problema que ya ha sido guardado por la opción “Guardar como” previamente.
- **Guardar como:** Al hacer clic sobre esta opción, se puede guardar por primera vez un problema del software en su estructura propia.
- **Salir:** Al hacer clic sobre esta opción, el software se cierra.

1.2. Ayuda

El menú ayuda ofrece la opción del submenú “Acerca de...” el cual muestra el nombre del software, la indicación de los derechos de propiedad intelectual que posee el ICIPC (Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y el Caucho) y el año de desarrollo, como se muestra en la Figura 39.

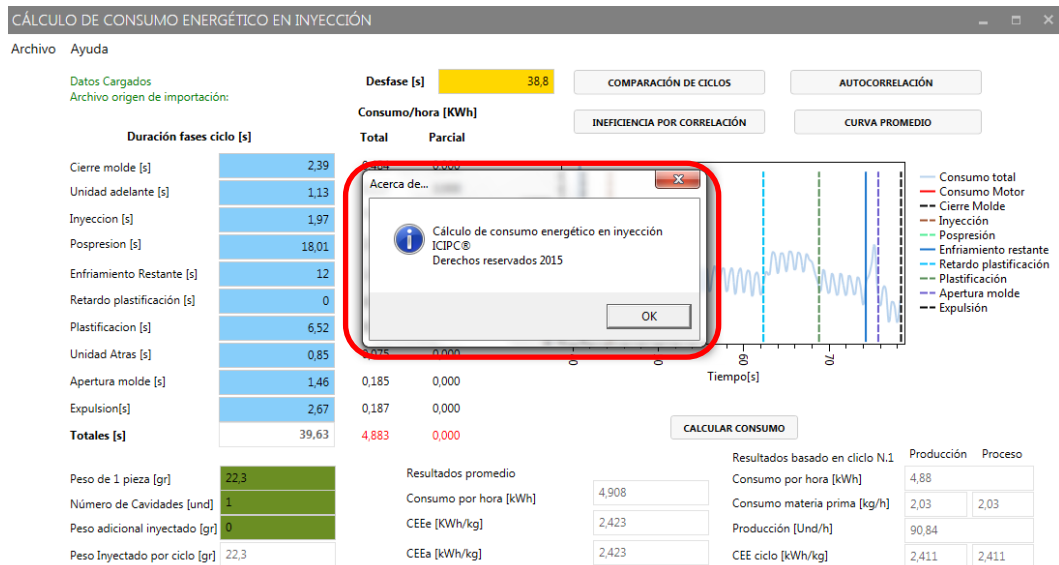


Figura 39. Acerca de...

2. Zona de parámetros de entrada

2.1. Datos

Aquí se muestran alertas que indican el éxito o fracaso al momento de cargar los datos y además el nombre del archivo de origen de importación, como se muestra en la Figura 40.

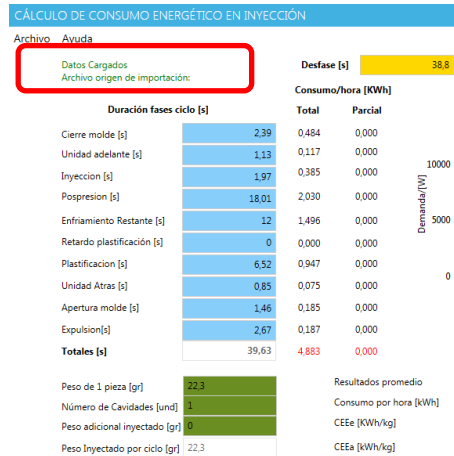


Figura 40. Mensajes de carga de datos

2.2. Duración de tiempos de ciclo

En estos campo se ingresan los tiempos que se tomó la maquina inyectora en realizar cada una de las fases del ciclo en segundos, parámetros necesarios para poder realizar los cálculos (Figura 41).

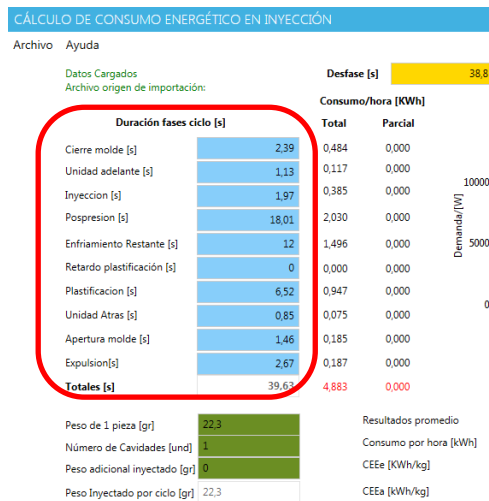


Figura 41. Tiempos del ciclo

2.3. Características de la pieza

En esta parte se deben ingresar tres parámetros fundamentales y necesarios como los son el peso de la pieza, el número de cavidades y el peso adicional inyectado (Figura 42).

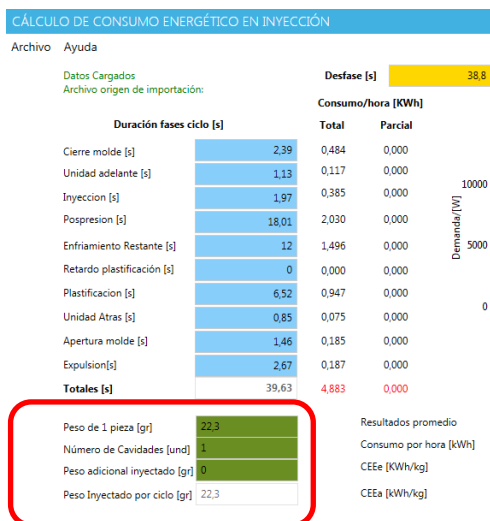


Figura 42. Características de la pieza

2.4. Tiempo de desfase

Es otro de los valores de entrada ya que con este de manera manual los expertos pueden ubicar los comportamientos significativos para los cuales se realizan los análisis a partir del segundo que se estipule en este campo (Figura 43).

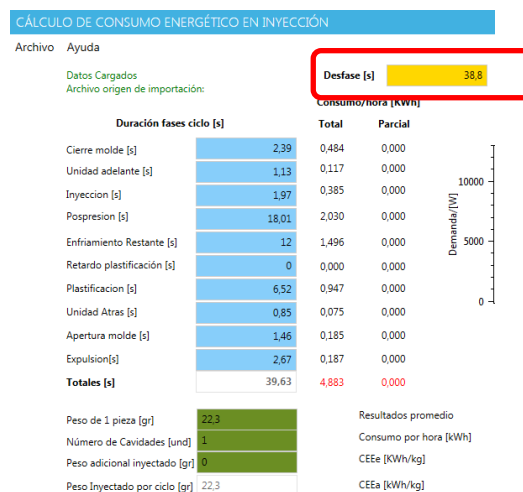


Figura 43. Desfase

3. Zona de resultados

3.1. Consumo/hora

En esta sección el software muestra el cálculo de los KWh consumidos tanto de manera total como parcial, partiendo de los datos de demanda cargados, más los parámetros de entrada del problema, realizando este cálculo para cada una de las fases del ciclo (Figura 44).

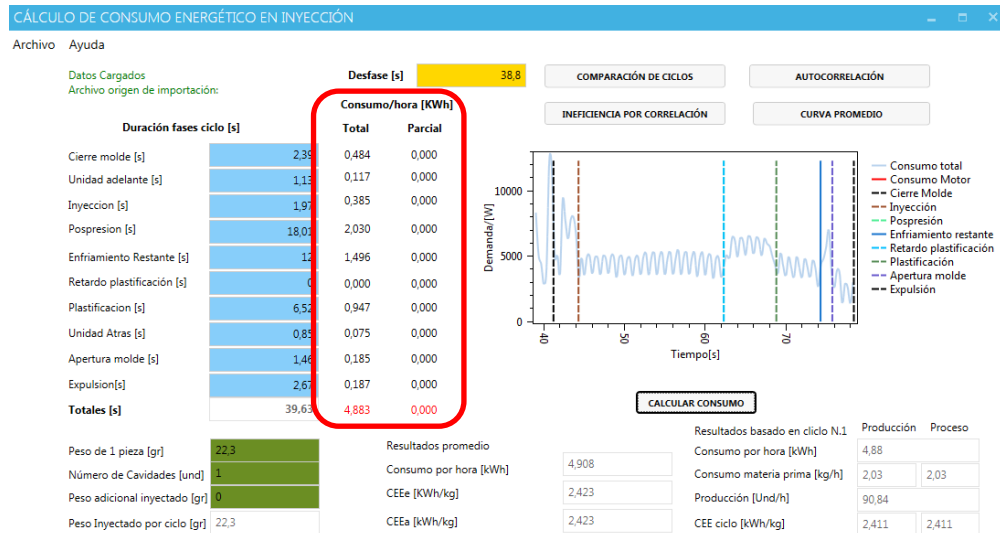


Figura 44. Cálculo de consumo/hora

3.2. Gráfico de tiempo vs Demanda

Este grafico muestra el comportamiento de un ciclo de inyección en el tiempo, en el cual además se identifican la variabilidad de cada una de las fases (Figura 45).

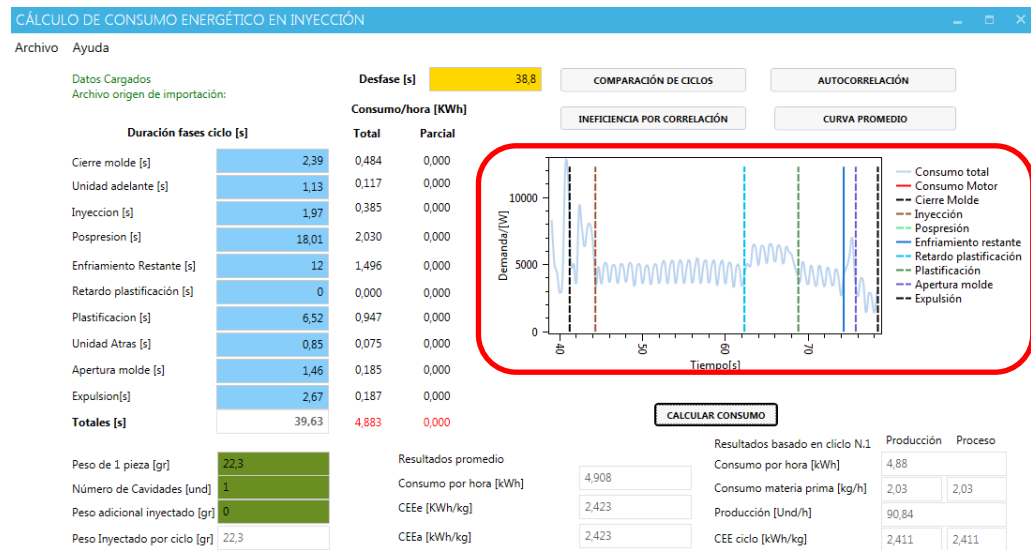


Figura 45. Gráfico

3.3. Resultados promedios

Esta parte muestra los consumos específicos promedios y basados en un ciclo, resultados valiosos que además distingue el consumo en el proceso y en producción (Figura 46).

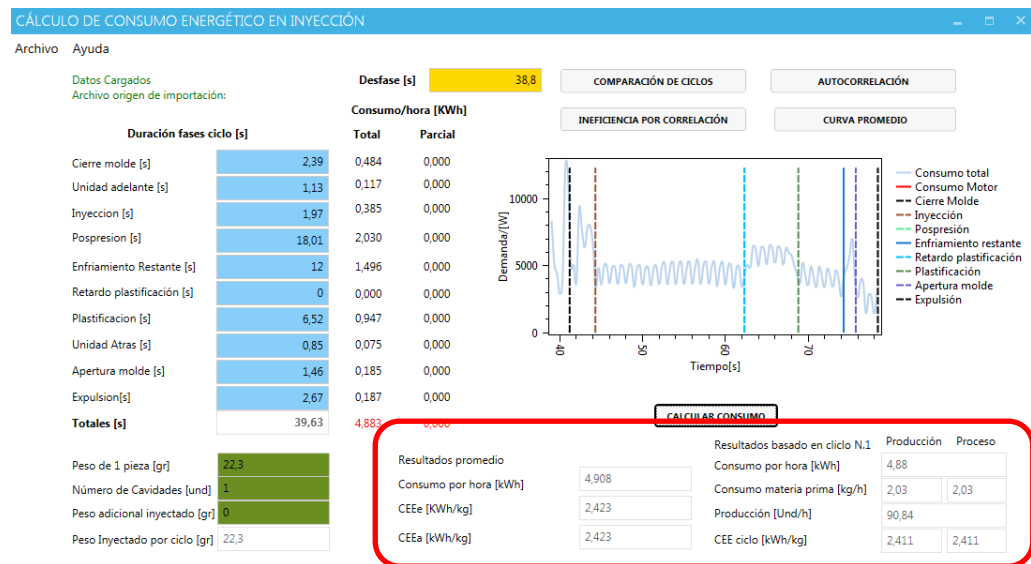


Figura 46. Resultados promedios

4. Zona de funcionalidades

4.1. Comparación de ciclos

Esta funcionalidad se activa haciendo clic en el botón “Comparación de ciclos”, para que luego esta acción abra una nueva ventana (Figura 47).

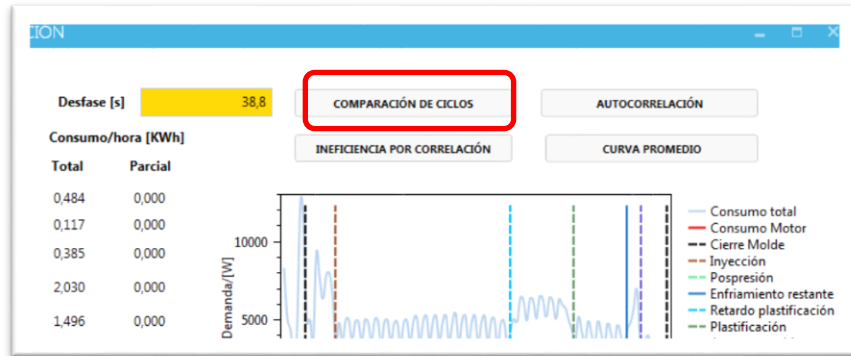


Figura 47. Inicio - Comparación ciclos

Al abrir la ventana de **Comparación de ciclos**, se presenta una lista desplegable que le permite al usuario elegir hasta 5 ciclos para comparar, mientras gráficamente estos se superponen, y permiten observar al usuario la correspondencia en su comportamiento entre uno y otro (Figura 48).

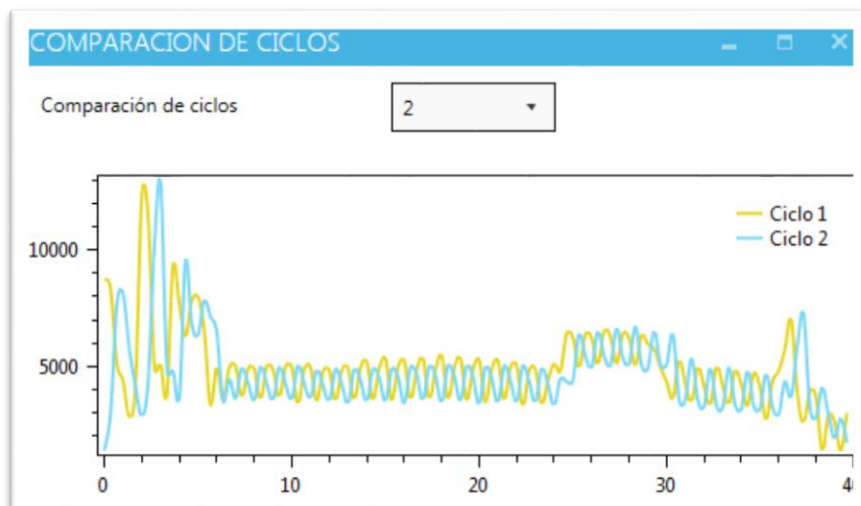


Figura 48. Funcionalidad de comparación de ciclos

4.2. Autocorrelación

Esta funcionalidad se activa haciendo clic en el botón “Autocorrelación”, para que luego esta acción abra una nueva ventana (Figura 47).



Figura 49. Inicio – Autocorrelación

Al abrir esta ventana, el sistema realiza un gráfico de autocorrelación del comportamiento de toda la medición analizada con la intención de identificar la estabilidad de la misma (Figura 50).

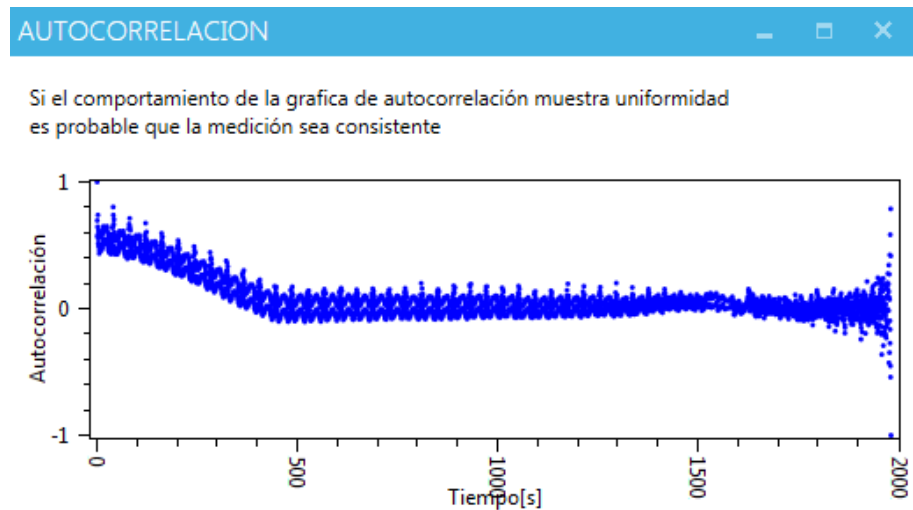


Figura 50. Función de autocorrelación

4.3. Ineficiencia por correlación

Esta funcionalidad se activa haciendo clic en el botón “Ineficiencia por correlación”, para que luego esta acción abra una nueva ventana (Figura 51).



Figura 51. Inicio – Ineficiencia por correlación

Al abrir esta funcionalidad, se muestran tres elementos importantes: **1. Un gráfico de tiempo vs correlación con el ciclo significativo**, un **2. Cuadro que muestra las diferencias**, tanto en tiempo como en consumo, que tiene cada uno de los ciclos de la medición respecto al ciclo significativo y **3. Promedios y desviación estándar** de los tiempos y de los consumos (Figura 52).

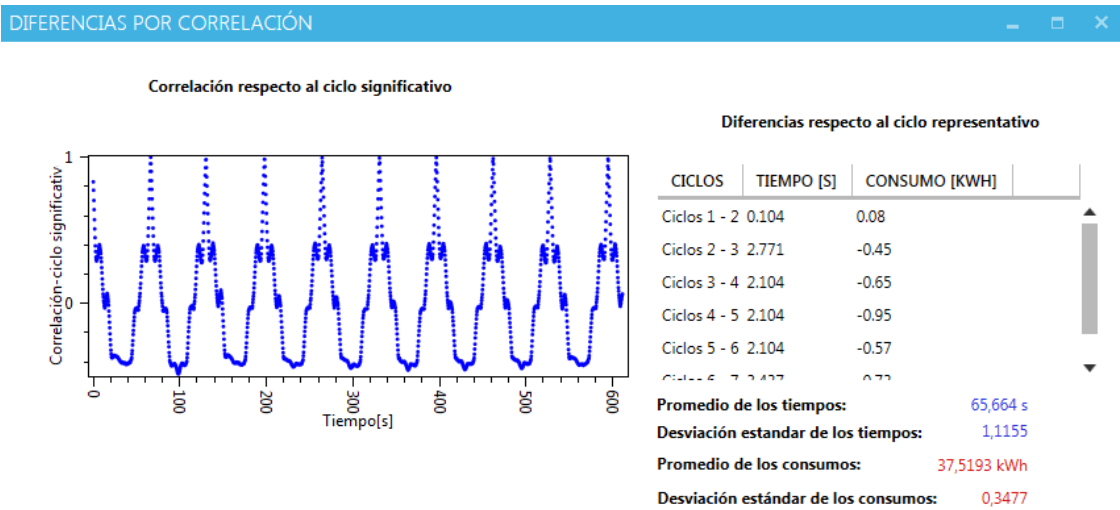


Figura 52. Diferencias por correlación

4.4. Curva promedio

Esta funcionalidad se activa haciendo clic en el botón “Curva promedio”, para que luego esta acción abra una nueva ventana (Figura 53).



Figura 53. Inicio - Curva promedio

En esta funcionalidad se muestra en la primera parte de la pantalla una lista desplegable llamada “Numero de ciclos a comparar” y un espacio de gráficos denominado “Sobre posición de ciclos”, en esta parte se eligen el número de ciclos que el usuario quiere observar para determinar su correspondencia entre ellos, mientras que se van graficando, igual a la funcionalidad de “Comparación de Ciclos”, pero a diferencia de esta funcionalidad esta ofrece una segunda parte en la que muestra una curva promedio del total de curvas elegidas y además ofrece la posibilidad de determinar qué tan similar es determinado ciclo respecto al promedio (Figura 54).

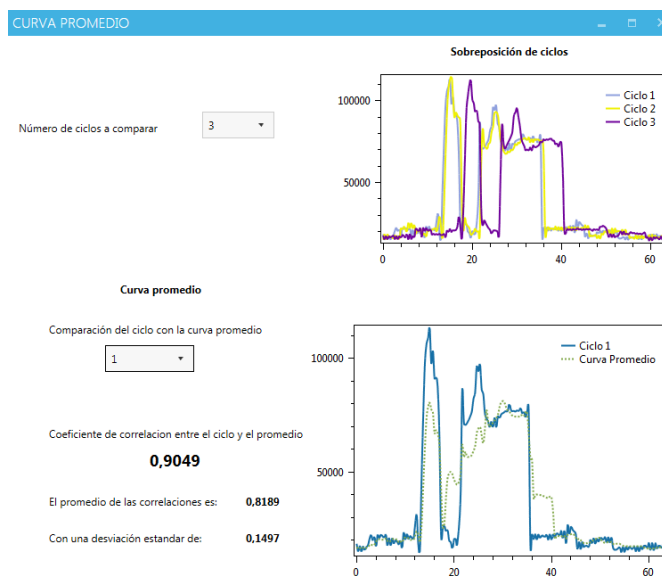


Figura 54. Curva promedio